



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS TERMOMECAÁNICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE PROCESOS DE
CORTE ORTOGONAL DE INCONEL 718**

**Para la obtención del Título de
INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ESPECIALIDAD MECÁNICA**

Autor: Juan José Martínez Mercado
Director: José Luis Cantero Guisández

Título: Análisis termomecánico mediante elementos finitos de procesos de corte ortogonal de INCONEL 718

Autor: Juan José Martínez Mercado.

Director: José Luis Cantero Guisández.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 3 de octubre de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Dedicatoria y agradecimientos

Dedicado a mi familia por haberme apoyado y haber confiado en mí.

**También quiero dar las gracias a todas las personas que me han ayudado y han confiado
en mí.**

Resumen

Este proyecto se centra en el análisis de una serie de parámetros tales como fuerza de corte, fuerza de avance, temperaturas, tensiones residuales en la superficie de la pieza mecanizada, espesor de viruta, ángulo de cizalladura, longitud de contacto viruta herramienta. Todo ello para un proceso de corte ortogonal realizado sobre el material INCONEL 718, que es un material empleado en diversas aplicaciones en el sector de la industria aeronáutica y automovilística.

La información obtenida en este análisis puede ser aplicada con vistas a la mejora en distintos aspectos del mecanizado del material a tratar, tales como controlar las tensiones residuales generadas en la pieza tras su mecanizado, ya que estas juegan un papel muy importante de cara al comportamiento de la pieza fabricada.

En este proyecto, se ha analizado una única geometría de herramienta con distintas condiciones de corte. Se ha utilizado un rozamiento tipo Coulomb, variando su coeficiente en dos zonas concretas, la de contacto viruta herramienta y la de la zona mecanizada herramienta.

La metodología a seguir ha sido, realizar una primera pasada y a partir de aquí generar dos casos posibles a analizar. En el primer caso, tras la primera pasada se retira la herramienta, se enfría la pieza a temperatura ambiente y se miden las tensiones residuales. En el segundo caso, se retira la herramienta, se enfría el tiempo correspondiente a una revolución del cabezal de la herramienta, se sitúa la herramienta en la posición inicial y se realiza una segunda pasada para posteriormente medir las tensiones residuales.

En cualquiera de los dos casos, también se extraen los parámetros de fuerzas, temperaturas, espesor de viruta, ángulo de cizalladura.

Una de las partes más críticas durante la simulación es conseguir un mallado denso de 5 micrómetros en la zona de interés, que es la zona de cizalladura y la zona de contacto del material con la herramienta.

Abstract

This Project focuses on the analysis of several parameters such as cut loads, temperatures, residual stress in the machining work piece surface, chip thickness, shear angle or chip-insert contact length. All of them are related to the process involved to obtain a turning in INCONEL 718 material, which is widely used for applications in aircrafts and automotive industry.

Information obtained in this analysis can be applied in order to put up results in the machining of the above-mentioned material, such as to control residual stresses generated in the work piece after the machining, since they have a very important role in the machining work piece behavior.

In this project, only a tool geometry has been analyzed under different cut conditions. Coulomb friction type has been used, using a different coefficient for two specific zones, chip-insert contact zone and machined face zone.

The methodology to be followed has been making a pass firstly and from this moment on, two cases have been generated for their subsequent analysis. In the first case, after the first pass, the tool has been moved away, the workpiece has been cooled down to room temperature and after this, and residual stresses have been measured. In the second case, the tool has been taken away and the workpiece has been cool down the equivalent time to a revolution of the tool head, the tool has been situated in the initial position and a second pass has been analyzed so as to measure residual stresses.

In both cases, loads and other parameters like temperatures, chip thickness or shear angle have been obtained.

One of the most critical points during the simulation has been how to get a mesh of 5 micrometers in the shear region and the workpiece-tool contact region.

Índice General

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUCCIÓN AL PROYECTO.	1
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.	2
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.	3
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES / ESTADO DEL ARTE	5
2.1 PROCESOS DE MECANIZADO.	5
2.2 TIPOS DE VIRUTA.	11
2.3 FUERZAS EN EL CORTE ORTOGONAL	15
2.4 TEMPERATURA Y DISTRIBUCIÓN EN HERRAMIENTA Y MATERIAL	16
2.5 ZONAS DE DEFORMACIÓN	22
2.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	24
2.7 MATERIAL INCONEL 718	29
CAPITULO III. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	32
3.1 INTRODUCCIÓN	32
3.2 ETAPAS DE DESARROLLO DEL MODELO	33
3.3. VALIDACIÓN DEL MODELO	51
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
4.1 INTRODUCCIÓN	54
4.2 EFECTO TERMOMECAÁNICO DE LA 1ª PASADA	54
4.3 ESPESOR DE VIRUTA Y ÁNGULO DE CIZALLADURA	60
4.4 LONGITUD DE CONTACTO VIRUTA HERRAMIENTA	66
4.5 FUERZA DE CORTE	71
4.6 FUERZA DE AVANCE	75
4.7 TEMPERATURAS	79
4.7.1. TEMPERATURA DEL MATERIAL ZONA VIRUTA-HERRAMIENTA	80
4.7.2. TEMPERATURA DEL MATERIAL EN ZONA MECANIZADA	84
4.7.3. TEMPERATURA MÁXIMA EN LA HERRAMIENTA Y POSICIÓN	88
4.8 TENSIONES RESIDUALES	92
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES / LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO	98
5.1 CONCLUSIONES	98
5.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO	99
CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA	101
6.1 BIBLIOGRAFÍA	101



CAPITULO I:

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



Capítulo I. Introducción y Objetivos.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN AL PROYECTO.

El mecanizado es uno de los procesos de fabricación más utilizado en la actualidad. Por este motivo el estudio sobre estos procesos de eliminación de materiales está en auge en la industrial actual (Kalpakjian et. al., 2002).

A pesar de los avances realizados en este campo, todavía existen carencias en las empresas con respecto a la simulación de procesos de mecanizado. En una industria competitiva es fundamental predecir el comportamiento de diferentes materiales. Esta predicción ofrece una manera fácil y económica de ahorrar tiempo, dinero y material en los prototipos (Åmstrom, 2004).

Dada la amplia naturaleza de la ciencia del corte de los metales, un estudio sobre este tema puede ser abordado desde muchas perspectivas, como el material de la pieza a fabricar, las características de la herramienta, la temperatura y la fuerza en la zona de corte, la velocidad de corte, la cantidad y el tipo de viruta generada, la rugosidad obtenida, o bien la combinación de todos ellos (Bäker, 2002).

Las simulaciones de los procesos de mecanizado enfocadas a las predicciones del comportamiento del proceso se realizan principalmente mediante el Método de Elementos Finitos (Özel, 2005), que permite, a partir de la resolución de una serie de ecuaciones, establecer las pautas del comportamiento de los materiales frente al proceso de mecanizado.

El material de la pieza analizado es el Inconel 718, que es un acero con aleación de níquel-cromo-molibdeno. Es una superaleación que tiene buenas propiedades de resistencia mecánica y a la corrosión, que se mantienen a temperaturas altas. Las aplicaciones de estas aleaciones son muy amplias: recipientes para tratamiento térmico, turbinas, aviación, plantas nucleares generadoras de energía, etc.



Capítulo I. Introducción y Objetivos.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.

La principal motivación de este estudio es el amplio uso del mecanizado en la industria actual y la necesidad de optimizar este proceso, contando para ello con la posibilidad de obtener un modelo de elementos finitos con resultados fiables para la predicción de diferentes procesos, lo cual es fundamental para la mejora de la etapa de experimentación, que consume tiempo y costes. Poder conocer datos sobre temperatura y fuerzas de corte antes de realizar el proceso real, resulta muy útil para predecir el comportamiento de los materiales, tanto de la pieza a mecanizar como de la herramienta.

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es desarrollar un modelo de elementos finitos de procesos de corte ortogonal del material INCONEL 718 para distintos parámetros de corte. El modelo considera la simulación de 2 pasadas de corte y se analizan las diferencias encontradas entre los resultados obtenidos después de la primera y después de la segunda pasada de corte.

El modelo se ha realizado contando con la base de la experiencia previa en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, en relación con modelos de corte desarrollados en el programa DEFORM 2D [Tesis de Nacarí Marín Calvo, 2010].

Asimismo se realizará un análisis de variables termomecánicas implicadas en el mecanizado en base a los resultados del modelo.



Capítulo I. Introducción y Objetivos.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.

El Proyecto Fin de Carrera se ha estructurado en 6 capítulos, con el siguiente contenido:

Capítulo 1: introducción y objetivos.

Capítulo 2: explicación teórica de conceptos clave de los procesos de mecanizado y una descripción teórica de los conceptos generales del método de elementos finitos.

Capítulo 3: se centra en la simulación realizada mediante elementos finitos del modelo desarrollado tratando factores a tener en cuenta a la hora de generar los modelos mediante el software. Se describen minuciosamente los pasos a seguir a fin de obtener una modelización robusta.

Capítulo 4: se muestran los resultados obtenidos del modelo numérico y se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas. Efecto de la Velocidad de corte y del avance. Efecto del nº de pasadas. Fuerzas de corte, temperaturas y tensiones residuales.

Capítulo 5: conclusiones sobre el modelo. Ideas de mejora para posibles trabajos futuros.

Capítulo 6: bibliografía.



CAPÍTULO II:

ANTECEDENTES / ESTADO DEL ARTE

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES / ESTADO DEL ARTE

2.1 PROCESOS DE MECANIZADO.

En la fabricación por mecanizado se obtienen las dimensiones y la naturaleza superficial deseada de la pieza separando partes del material (virutas) por medios mecánicos y con herramientas de filo. Es el filo de la herramienta el que realiza el arranque de viruta, y según éste, los procesos de fabricación por arranque de viruta se clasifican en:

- Procesos de arranque con filos geoméricamente determinados, en los que las herramientas arrancan las virutas con filos que tienen formas geométricas definidas.
- Procesos de arranque con filos no determinados, en los que se arrancan finas virutas con granos abrasivos que no tienen una forma geométrica determinada. [Apuntes de Tecnología mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, año 2009]

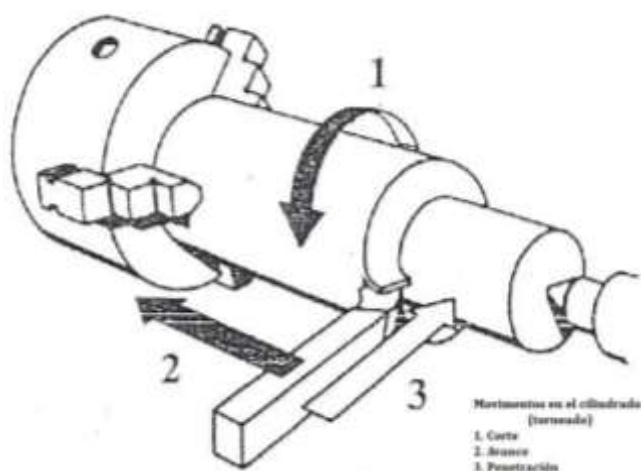


Figura 1: esquema proceso de mecanizado (torneado)

Fundamentos del arranque de viruta

Los procesos de mecanizado se llevan a cabo en máquinas herramienta, utilizando herramientas de corte y elementos de sujeción. En la máquina herramienta se colocan y sujetan las herramientas y las piezas a mecanizar. Las herramientas de corte deben cortar el material en forma de viruta, por lo que es preciso que soporten las fuerzas producidas en el corte y que presenten elevada dureza y resistencia al desgaste. Los elementos de sujeción permiten sujetar la pieza y la herramienta en la máquina



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

Movimientos en el arranque de viruta

Para que se produzca el arranque de viruta, deben realizarse movimientos relativos entre la herramienta y la pieza, de forma que se produzca una interacción entre ambas. Los distintos tipos de movimientos que aparecen en un proceso de arranque de viruta son:

1. El **movimiento de corte**, que es aquel que, sin movimiento de avance, sólo arranca viruta durante una revolución (si el movimiento es circular, como es el caso del torneado o fresado) o durante una carrera (si el movimiento es rectilíneo, como en el caso del cepillado).
2. El **movimiento de avance**, que combinado con el de corte, hace posible el arranque continuo de virutas.
3. El **movimiento de penetración**, que determina la profundidad del corte y, por tanto, el espesor de la viruta que se arranca.

Magnitudes de corte y de las virutas producidas

Se denomina magnitudes de corte o parámetros tecnológicos de corte a los valores que hay ajustar en el proceso de arranque de viruta para que éste se realice de forma óptima.

- Velocidad de corte (V_c)

Es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte. Se mide normalmente en metros por minuto (m/min). Si es excesivamente baja, la productividad es muy pequeña; si, por el contrario, se trabaja a demasiada velocidad, la herramienta se desgastará rápidamente. Los catálogos de los fabricantes de herramientas indican valores orientativos adecuados para cada material. Depende de múltiples factores, tales como material de la pieza, el material de la herramienta, la sección de viruta, la refrigeración, el tipo de construcción de la máquina, etc.

A partir de este dato (V_c) se calculan las revoluciones por minuto (n en r.p.m.) a las que debe girar la pieza o la herramienta, según sea el proceso, en la máquina. La relación entre V y n para los procesos de torneado y fresado es en ambos casos:

$$V_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{1000}$$

siendo:

V_c = Velocidad de corte en m/min.

D = Diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en mm.



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

n = Revoluciones de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en un minuto (r.p.m.).

- Avance

El avance (a) es el desplazamiento relativo herramienta-pieza en cada revolución o carrera. Se expresa en milímetros (mm). Conocidos la velocidad de giro (n en r.p.m.) y el avance (a en mm), se calcula la velocidad de avance (V_a), que se suele expresar en milímetros por minuto (mm/mm). Su cálculo se realiza mediante la expresión:

$$V_a = a \cdot n$$

- Profundidad de corte

La profundidad de corte o profundidad de pasada (p) es la distancia que penetra la herramienta en la pieza. Se expresa en milímetros.

A partir de la profundidad de corte (p) y del avance (a) se calcula otra magnitud de corte: la sección de viruta (S), que se expresa en milímetros cuadrados (mm²):

$$S = a \cdot p$$

La herramienta de corte es la que realiza el arranque de material, gracias al movimiento relativo entre ella y la pieza. Algunas herramientas quitan el material en forma de viruta (fresas, brocas, etc.), y otras en forma de pequeñas partículas (sierra, muela, etc.). Se distingue entre herramientas de filo único y filo múltiple.

Las herramientas de filo múltiple pueden estar animadas de un movimiento de rotación (fresa, sierra, etc.) o de traslación (escariador, broca, etc.). La ventaja de estas herramientas consiste en que son capaces de un corte más rápido.

Las herramientas de corte monofilo estructuralmente constan de dos partes, una cortante (o elemento productor de viruta), y otra denominada cuerpo. Las primeras están constituidas por una sola pieza de acero, afilada en un extremo, o bien por una plaquita postiza de un material especial, sujeta al mango de la herramienta. Se encuentran normalmente en tornos, tornos revólver, cepillos, limadoras, mandriladoras y máquinas herramientas semejantes.

En la Figura se muestra una herramienta monofilo típica y las partes más importantes: sus filos y superficies adyacentes.

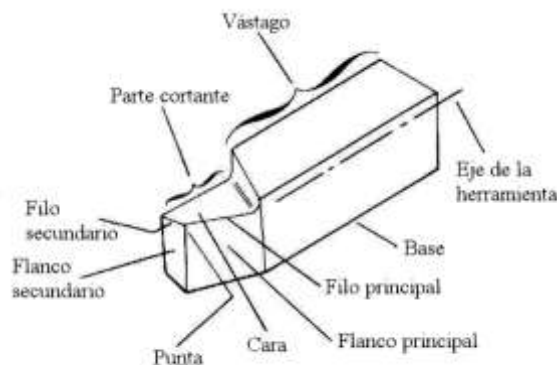


Figura 2: imagen de las partes de la herramienta

A continuación se describen las partes más importantes de este tipo de herramientas:

- **Cara:** Es la superficie o superficies sobre las cuales fluye la viruta (superficie de desprendimiento).
- **Flanco:** Es la superficie de la herramienta frente a la cual pasa la viruta generada en la pieza (superficie de incidencia).
- **Filo:** Es la parte que realiza el corte. El filo principal es la parte del filo que ataca la superficie transitoria en la pieza. El filo secundario es la parte restante del filo de la herramienta.
- **Punta:** Es la parte del filo donde se cortan los filos principales y secundarios; puede ser aguda o redondeada o puede ser intersección de esos filos.

Las propiedades más importantes que deben tener las herramientas de corte son las siguientes:

- Dureza en caliente.
- Resistencia mecánica, ya que trabaja como una viga en voladizo.
- Evacuar el calor producido durante la operación.
- Tenacidad; debe ser capaz de soportar las fuerzas de corte sin deformarse.
- Resistencia al desgaste.

En los procesos de arranque de material con herramientas de filo, se consideran dos casos: corte ortogonal y corte oblicuo.

El corte oblicuo, se caracteriza por la existencia de un ángulo de inclinación de la arista del filo de la herramienta de corte (Figura 3).

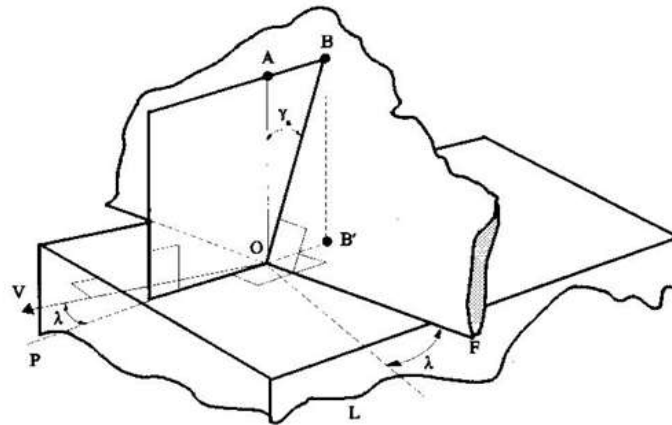


Figura 3: esquema de corte oblicuo

El corte ortogonal, es en el que el filo es perpendicular a la velocidad relativa entre la herramienta y la pieza (ver Figura 4 y Figura 5). El flujo de viruta se da en el mismo plano que dicha velocidad.

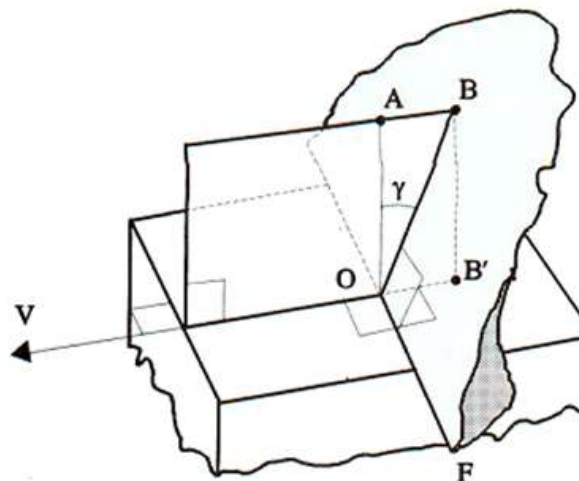


Figura 4: esquema de corte ortogonal

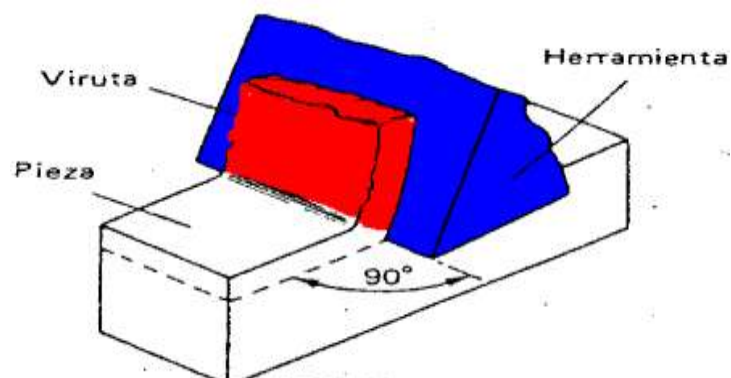


Figura 5: esquema de corte ortogonal

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

En los casos reales de corte, suele existir siempre un ángulo de inclinación de la arista, pero debido a que nunca supera los 10° , realizar el estudio suponiendo un corte ortogonal es una buena aproximación, permitiendo a su vez la utilización del modelo numérico para obtener los resultados.

Ángulos en el corte ortogonal

Los **elementos** importantes de una **herramienta** en el corte ortogonal son:

- El **filo** o arista cortante.
- La **superficie de ataque o de desprendimiento**, que es la cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido.
- La **superficie de incidencia**, que es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.

Los **ángulos** que definen la posición de las superficies anteriores son (ver Figura 6)

- Ángulo de **incidencia** (α), formado por la superficie de incidencia y el plano que contiene al filo y a la velocidad de corte.
- Ángulo de filo o **herramienta** (β), formado por las superficies de incidencia y desprendimiento.
- Ángulo de **desprendimiento** (γ), formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo.

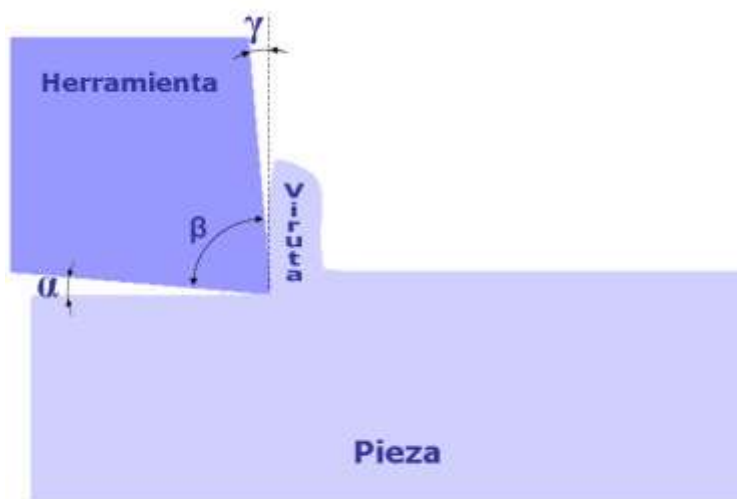


Figura 6: ángulos de corte



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

Si el ángulo de incidencia es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta, por lo que produce un roce excesivo, un aumento de temperatura y, en consecuencia, un desgaste más rápido de la herramienta. Por el contrario, si es demasiado grande, se debilita el filo. La elección del ángulo de incidencia correcto se hace en función del material de la pieza y de la herramienta.

Un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte bien, dando un mejor acabado superficial, pero queda muy debilitado el filo. Un ángulo de desprendimiento pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan. En general, el ángulo de desprendimiento más adecuado será el mayor que la herramienta pueda soportar sin romperse. Su elección estará condicionada por la resistencia del material de la herramienta, el material a mecanizar y el avance.

En función del valor del ángulo de desprendimiento, las herramientas de corte se clasifican en herramientas con geometría positiva cuyo ángulo de desprendimiento es mayor que cero (acero rápido...) y herramienta con geometría negativa las que el ángulo de desprendimiento es menor que cero (metal duro...).

2.2 TIPOS DE VIRUTA.

El torneado ha evolucionado tanto que ya no se trata tan solo de arrancar material a gran velocidad, sino que los parámetros que componen el proceso tienen que estar estrechamente controlados para asegurar los resultados finales de economía, calidad y precisión.

La forma de tratar la viruta se convierte en un proceso complejo, donde intervienen todos los componentes tecnológicos del mecanizado, para que pueda tener el tamaño y la forma que no perturbe el proceso de trabajo. Si no fuera así se acumularían rápidamente masas de virutas largas y fibrosas en el área de mecanizado que formarían madejas enmarañadas e incontrolables.

La forma que toma la viruta se debe principalmente al material que se está cortando y puede ser de material dúctil y también quebradiza y frágil.

Al observar la formación real de virutas bajo distintas condiciones de corte, se ven desviaciones apreciables del modelo ideal.

Una viruta posee dos superficies: una en contacto con la cara de la herramienta (cara de ataque) y otra de la superficie original de la pieza. La cara de la viruta hacia la herramienta es



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

brillante o bruñida, y ello se debe al frotamiento de la viruta al subir por la cara de la herramienta. La otra superficie de la viruta no se pone en contacto con cuerpo alguno. Esta superficie posee un aspecto rasgado y áspero, que se debe al propio proceso de corte.

El tipo de viruta está determinado primordialmente por:

- a) Propiedades del material a trabajar.
- b) Geometría de la herramienta de corte.
- c) Condiciones de corte (profundidad de corte, velocidad de avance y velocidad de corte).

En general, es posible diferenciar inicialmente tres tipos de viruta:

1) Viruta continua:

Las virutas continuas se suelen formar con materiales dúctiles a grandes velocidades de corte y/o grandes ángulos de ataque.

Aunque en general producen buen acabado superficial, las virutas continuas no siempre son deseables, en especial en las máquinas herramientas controladas por computadora que son habituales hoy en día. Tienden a enredarse en el portaherramientas, los soportes y la pieza, así como en los sistemas de eliminación de viruta, y se debe parar la operación para apartarlas.

Este problema se puede aliviar con los rompevirutas, y cambiando los parámetros, como la velocidad de corte, el avance y los fluidos de corte.

2) Viruta escalonada o segmentada:

Las virutas escalonadas (también denominadas virutas segmentadas o no homogéneas) son semicontinuas, con zonas de baja y alta deformación cortante. Los metales con baja conductividad térmica y resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura, como el titanio, muestran este comportamiento. Las virutas tienen un aspecto de viruta serrada.

3) Viruta discontinua:

Las virutas discontinuas consisten en segmentos que pueden fijarse, de forma firme o floja, entre sí. Se suelen formar bajo las siguientes condiciones:

- Materiales frágiles en la pieza, porque no tienen la capacidad para absorber las grandes deformaciones constantes que se presentan en el corte.
- Materiales de la pieza que contienen inclusiones e impurezas duras.
- Velocidades de corte muy bajas o altas.

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

- Grandes profundidades de corte.
- Ángulos de ataque bajos.
- Falta de un fluido de corte eficaz.
- Baja rigidez de la máquina de la herramienta

Por la naturaleza discontinua de la formación de virutas, las fuerzas varían en forma continua durante el corte. En consecuencia, adquieren importancia la rigidez del portaherramientas y de los sujetadores de la pieza, así como de la máquina herramienta, cuando se forman virutas discontinuas o escalonadas

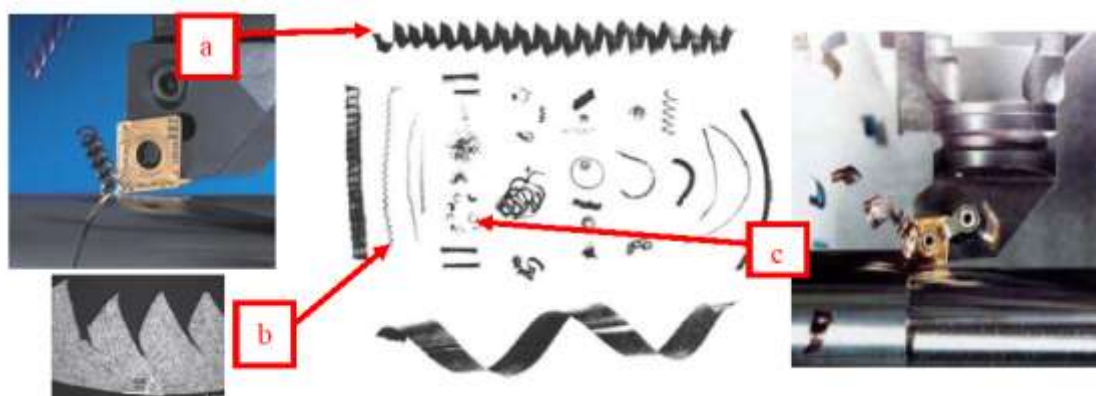


Figura 7: tipos de viruta. a) Continua; b) segmentada; c) discontinua

El avance con el que se trabaje y la profundidad de pasada, son bastante responsables de la forma de viruta, y cuando no se puede controlar con estas variables hay que recurrir a elegir la herramienta que lleve incorporado un rompevirutas eficaz.

Las virutas largas y continuas son indeseables, porque constituyen un riesgo potencial de seguridad, tienden a enredarse e interferir con las operaciones de corte.

Si todas las variables independientes de maquinado están bajo control, el procedimiento normal para evitar esta viruta continua es romperla en forma intermitente con un rompevirutas. Aunque el rompevirutas ha sido por tradición una placa de metal fija a la cara de ataque de la herramienta que dobla la viruta y la rompe, la mayor parte de las herramientas de corte poseen características incorporadas de rompevirutas, con distintos diseños de insertos individuales.

También se pueden romper las virutas debido a la geometría de la herramienta, controlando así el flujo.

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

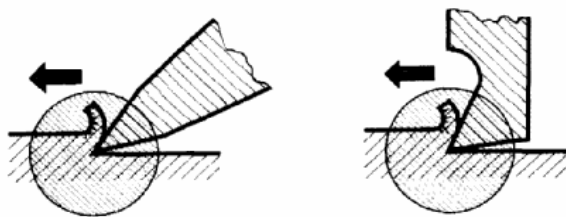


Figura 8: geometría de la herramienta

Elección de la Herramienta para Mecanizado

En el torno moderno y debido al alto coste que tiene el tiempo de mecanizado, es de vital importancia hacer una selección adecuada de las herramientas que permita realizar los mecanizados en el menor tiempo posible y en las condiciones de precisión y calidad requeridas.

Factores de selección para operaciones de torneado:

- **Diseño y limitaciones de la pieza:** Tamaño, tolerancias del torneado, tendencia a vibraciones, sistemas de sujeción, acabado superficial. Etc.
- **Operaciones de torneado a realizar:** Cilindrados exteriores o interiores, refrentados, ranurados, desbaste, acabados, optimización para realizar varias operaciones de forma simultánea, etc.
- **Estabilidad y condiciones de mecanizado:** Cortes intermitente, voladizo de la pieza, forma y estado de la pieza, estado, potencia y accionamiento de la máquina, etc.
- **Disponibilidad y selección del tipo de torno:** Posibilidad de automatizar el mecanizado, poder realizar varias operaciones de forma simultánea, serie de piezas a mecanizar, calidad y cantidad del refrigerante, etc.
- **Material de la pieza:** Dureza, estado, resistencia, maquinabilidad, barra, fundición, forja, mecanizado en seco o con refrigerante, etc.
- **Disponibilidad de herramientas:** Calidad de las herramientas, sistema de sujeción de la herramienta, acceso al distribuidor de herramientas, servicio técnico de herramientas, asesoramiento técnico.
- **Aspectos económicos del mecanizado:** Optimización del mecanizado, duración de la herramienta, precio de la herramienta, precio del tiempo de mecanizado.

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

2.3 FUERZAS EN EL CORTE ORTOGONAL

Las fuerzas de reacción del material no actúan en el mismo filo, sino en una zona tanto más alejada de él cuanto más pequeño sea el ángulo de desprendimiento. Se tienen las siguientes fuerzas una vez comenzado el mecanizado:

- F_c = fuerza de corte, que nos permitirá conocer la potencia necesaria.
- F_d = fuerza de deslizamiento, permite calcular las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta.
- F_r = fuerza de rozamiento entre viruta y herramienta.

$$R = F_c + N_c = F_d + N_d = F_r + N_r$$

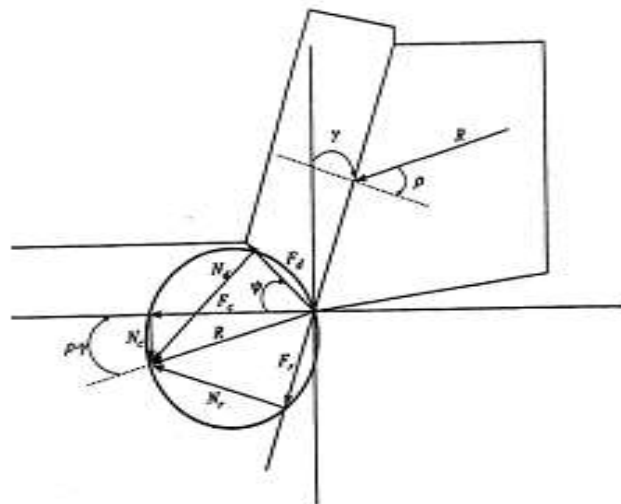


Figura 9: esquema de fuerzas en el corte ortogonal

$$F_c = R \cos (\rho - \gamma)$$

$$N_c = R \sin (\rho - \gamma)$$

$$F_d = R \cos (\psi + \rho - \psi)$$

$$N_d = R \sin (\psi + \rho - \gamma)$$

$$F_r = R \sin \rho$$

$$N_r = R \cos \rho$$



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

De estas expresiones se puede obtener que el coeficiente de rozamiento entre viruta y herramienta viene dado por:

$$\mu = F_r / N_r$$

La zona de soldadura está formada por puntos de la superficie de la herramienta cercanos al filo, donde se producen las microsoldaduras. Se requiere una fuerza de rozamiento que produzca un cizallado entre las uniones soldadas:

$$F_s = \sigma_s A_s$$

Donde σ_s es la tensión de cortadura y A_s el área de deslizamiento

Las microsoldaduras provocan un peor acabado superficial, además al cizallarse provocan desgastes de cráter y si hay muchas, filo recrecido.

2.4 TEMPERATURA Y DISTRIBUCIÓN EN HERRAMIENTA Y MATERIAL

El arranque de la viruta y el trabajo empleado en su deformación se transforman en calor que provoca elevadas temperaturas en la zona de corte.

Estas elevadas temperaturas afectan al rendimiento de la herramienta y a la calidad de la pieza. Las mayores temperaturas se alcanzan en la superficie de desprendimiento de la herramienta, en zonas cercanas al filo.

Parte del calor generado en el mecanizado se disipa a través del ambiente y fluido de corte en el caso de utilizarse. El resto del calor se evacua:

- Por la viruta (80%)
- Por la herramienta (15%), interesa que sea rápido.
- Por la pieza (5%), lo evacua bien al tener mucha masa.

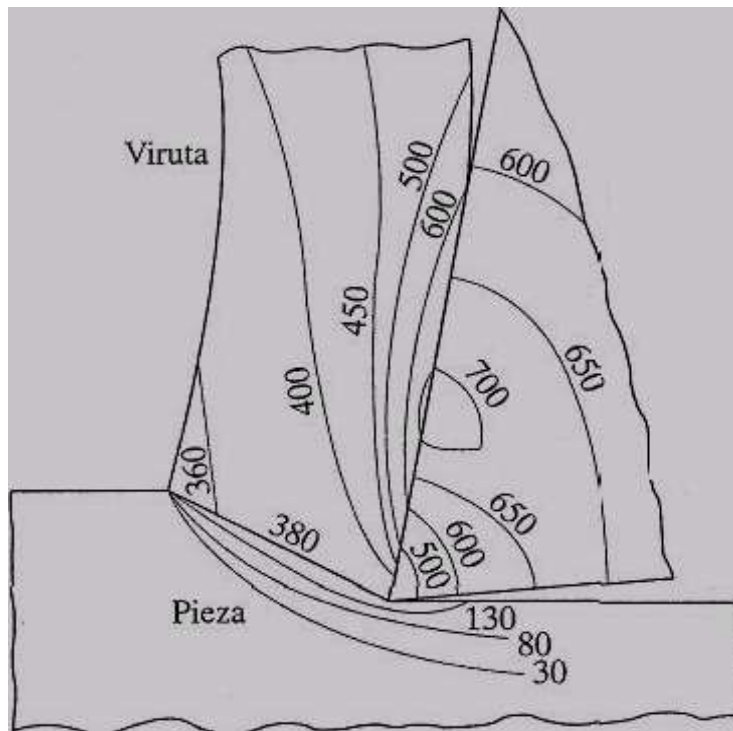


Figura 10: Distribución típica de temperaturas en la zona de corte (Kalpakjian et al., 2002)

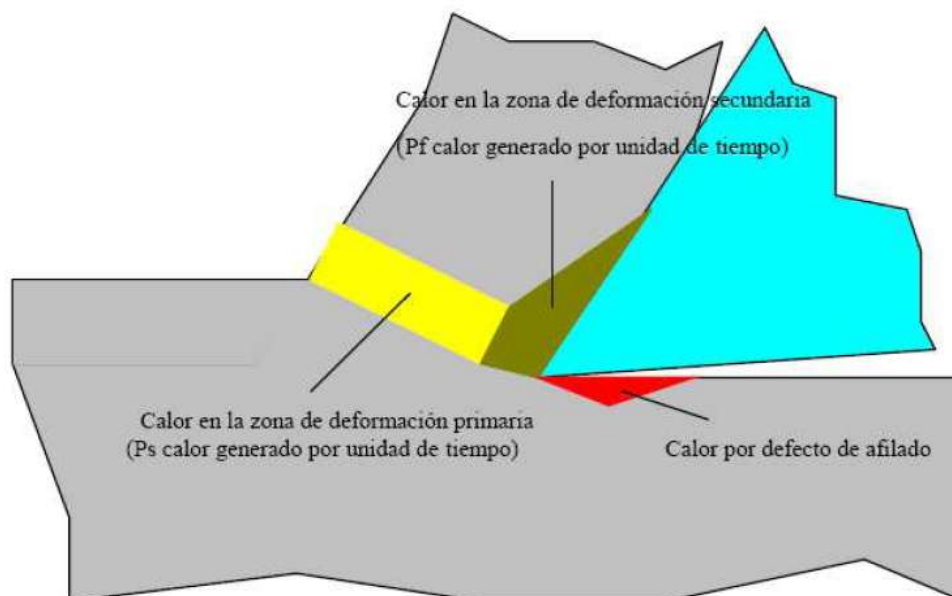


Figura 11: Calor producido en las diferentes zonas térmicas (Kalpakjian et al., 2002)

El reparto entre estos tres medios de disipación depende de la velocidad de corte, al aumentarla disminuye el porcentaje evacuado por la pieza y herramienta y aumenta el calor evacuado por la viruta, hecho que se considera deseable. Para disminuir la temperatura de la herramienta se aumenta su sección o se refrigera adecuadamente. Esto último se consigue mediante los fluidos de corte, que son capaces de alargar la vida de las herramientas, y conseguir un mejor acabado dado que permiten aumentar la velocidad de corte.



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

El agua es el mejor refrigerante, pero no un buen lubricante. Si lo primordial es refrigerar, se usa agua con aceites solubles (emulsiones o taladrinas), y si interesa lubricar, aceites de corte. Importante factor es que el líquido sea abundante, continuo y vaya dirigido al punto de contacto herramienta-pieza-viruta.

Además, otras funciones de los fluidos de corte son eliminar las virutas y proteger a la pieza y máquina del óxido. Debe ser una emulsión estable y tener un buen control bacteriológico.

Tipos de aceites de corte: la selección dependerá del tipo de operación, condiciones, material... la clasificación regulada por la DIN 51385 y la ASTM D 2881 es la siguiente:

- Aceites de corte: aceites minerales, poco poder de refrigeración.
Operaciones severas, con grandes caudales de viruta.
- Taladrinas de aceite solubles: emulsiones de agua y aceites minerales o vegetales.
Aspecto lechoso, operaciones de mecanizado medio y ligero.
- Taladrinas semisintéticas: llevan inhibidores de oxidación, bactericidas...
- Taladrinas sintéticas: no incluyen aceite. Refrigeración y control de la corrosión.

El fluido de corte es un elemento que se debe evitar utilizar siempre que sea posible, por razones medioambientales, ya que es altamente contaminante. En la actualidad la tendencia a seguir es el mecanizado en seco.

Rozamiento en el corte

El arranque de viruta se produce por deformación, que llega a crear temperaturas en la herramienta de 600 a 1000 grados centígrados. A su vez, la presión de la viruta sobre la herramienta es enorme, de hasta 1400 Kg/cm².

El calor generado es causado por la deformación del metal (75% aproximadamente) y por la fricción entre la viruta y la herramienta (25%), y este calor es el mayor enemigo de la duración de la herramienta.

El rozamiento entre la viruta y la herramienta durante un proceso de mecanizado corresponde a dos tipos rozamiento, el de Coulomb y el de adhesión



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

- Rozamiento de Coulomb

Incluso la superficie metálica “plana” mejor preparada presenta numerosas crestas y valles. Cuando dos superficies son colocadas juntas, el contacto se establece únicamente entre los picos de unas pocas irregularidades en cada superficie. Si se aplica una fuerza normal, se produce el aplastamiento en las puntas de los relieves que están en contacto, y el área real de contacto A_r , aumenta hasta que es capaz de soportar la carga aplicada. Para la mayoría de las aplicaciones este área es solo una fracción del área aparente de contacto A_a y viene dada por la siguiente expresión:

$$A_r = \frac{N}{\sigma_y}$$

Donde N es la fuerza normal y σ_y el límite elástico del metal más blando. En estas condiciones el rozamiento es independiente del área aparente de contacto y proporcional a la fuerza normal entre las dos superficies.

$$F_R = \mu \cdot N$$

Coulomb verificó esta ley y añadió que el coeficiente de rozamiento es esencialmente independiente de la velocidad de deslizamiento.

Este tipo de rozamiento es el que se produce entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta en zonas suficientemente alejadas del filo.

- Rozamiento por adhesión

En puntos de la superficie de la herramienta cercanos al filo, las altísimas presiones pueden producir que el área real de contacto se aproxime, o llegue a igualar al área aparente (A_a). Bajo estas circunstancias se ha alcanzado el valor máximo de A_r por lo que la fuerza de rozamiento se mantiene constante con independencia de la fuerza normal existente entre viruta y herramienta.

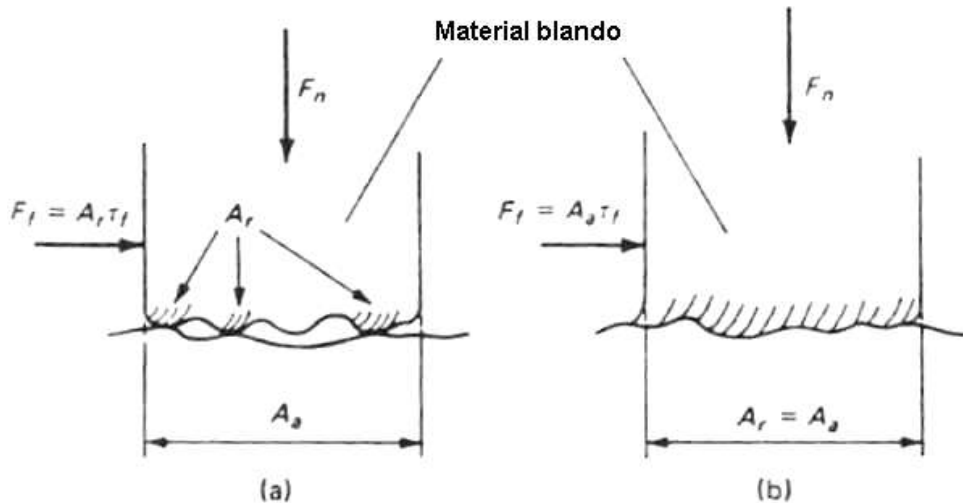


Figura 12: (a) Rozamiento por deslizamiento (b) Rozamiento por soldadura

Las elevadas temperaturas debidas al rozamiento y las presiones ocasionan la formación de microsoldaduras entre viruta y herramienta. Para que se produzca el deslizamiento se requiere una fuerza que produzca el continuo cizallado de las uniones soldadas. La fuerza total de rozamiento F_R viene por tanto dada por:

$$F_R = \tau_R \cdot A_r \approx \tau_R \cdot A_a$$

donde τ_R es la tensión de cortadura del metal más blando.

Este tipo de rozamiento se denomina por soldadura o adherencia. La existencia del fenómeno de adherencia en los procesos de mecanizado se comprueba observando la superficie interior de la viruta en piezas en las cuales la acción de corte fue interrumpida repentinamente. Esta observación revela que en una zona adyacente al filo de corte de la herramienta, las marcas de rectificado de la cara de la herramienta fueron impresas sobre la superficie de la viruta, indicando que no ha tenido lugar ningún movimiento relativo entre la viruta y la herramienta, y que las áreas real y aparente de contacto son iguales en esta región. Estas observaciones han sido confirmadas ópticamente usando herramientas transparentes de zafiro y fotografías a alta velocidad. El rozamiento por adhesión puede consumir hasta la cuarta parte de la energía de corte.

- Rozamiento durante el corte

El estudio del rozamiento durante el proceso de corte en los metales ha conducido al modelo de corte ortogonal con viruta continua y filo no recrecido mostrado en la figura 7.

Se observa que las tensiones normales entre la viruta y la herramienta son suficientemente elevadas para causar que A_r / A_a se aproxime a la unidad sobre una zona de longitud, adyacente al filo de corte de la herramienta, denominada zona de soldadura. En la longitud que se extiende desde el final de dicha zona hasta el punto donde la viruta pierde el contacto con la herramienta, la proporción A_r / A_a es menor que la unidad, y por lo tanto el coeficiente de rozamiento es constante. A esta región se la denominó zona de deslizamiento.

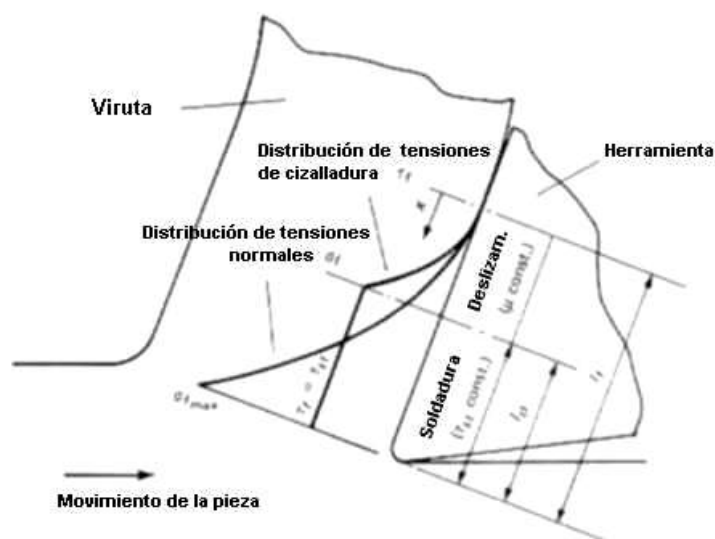


Figura 13: Modelo de rozamiento viruta - herramienta en corte ortogonal

Cuando está presente el fenómeno de soldadura, el ángulo medio de fricción ρ sobre la cara de la herramienta dependerá de la forma de la distribución de la presión normal sobre dicha cara, de la longitud de contacto entre viruta y herramienta, de la tensión media de cortadura para el material de la viruta en la zona soldada, y del coeficiente de rozamiento en la zona de deslizamiento.

Un análisis de la distribución de presiones sobre la cara de la herramienta muestra que el ángulo medio de rozamiento depende principalmente de la tensión normal media sobre la superficie de la herramienta. Este resultado explica la influencia del ángulo γ sobre la fuerza de rozamiento, puesto que a medida que se incrementa γ , la componente normal a la herramienta de la fuerza resultante de corte disminuirá, y por tanto la presión normal media disminuirá también.



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

Cuando se cizallan las microsoldaduras, se arrancan partículas de material de la superficie de la herramienta, que se eliminan junto con la viruta. Esto produce una cavidad en la superficie de la herramienta (desgaste por cráter), que generalmente comienza por encima del filo de corte.

Si se forma un número suficiente de estos puntos de soldadura cerca del filo de corte, ya no pueden ser totalmente cortados de la superficie de la herramienta, y se forma en la cara de la herramienta lo que se conoce por recrecimiento en el filo.

Partes de este recrecimiento en el filo se separan ocasionalmente, y son arrastradas con la viruta. Sin embargo, muchas de estas partículas metálicas también se deslizan por debajo del filo de corte de la herramienta, y permanecen adheridas a la pieza. La consecuencia es un pobre acabado superficial y riesgo de rotura o arranque de partículas en la arista de corte.

2.5 ZONAS DE DEFORMACIÓN

En general, los investigadores se decantan por diferenciar dos zonas de deformación en la pieza mecanizada (Umbrello et al., 2006; Filice et al., 2006; Bil et al., 2004; Özel et al., 1998). En estas zonas es donde se genera mayor incremento de temperatura debido a la deformación o al rozamiento entre pieza y herramienta.

La zona de deformación primaria se lleva la mayor parte del calor generado debido a la deformación ocurrida en el plano de corte y al rozamiento interno de la pieza mecanizada. Experimentalmente se ha observado que esta zona tiene siempre el mismo espesor (Zeren et al., 2004).

En la zona de deformación secundaria (Åmstrom, 2004) el aumento de temperatura se produce debido al rozamiento entre la cara de desprendimiento de la herramienta y la pieza. Estas zonas se pueden ver representadas en la Figura 14.

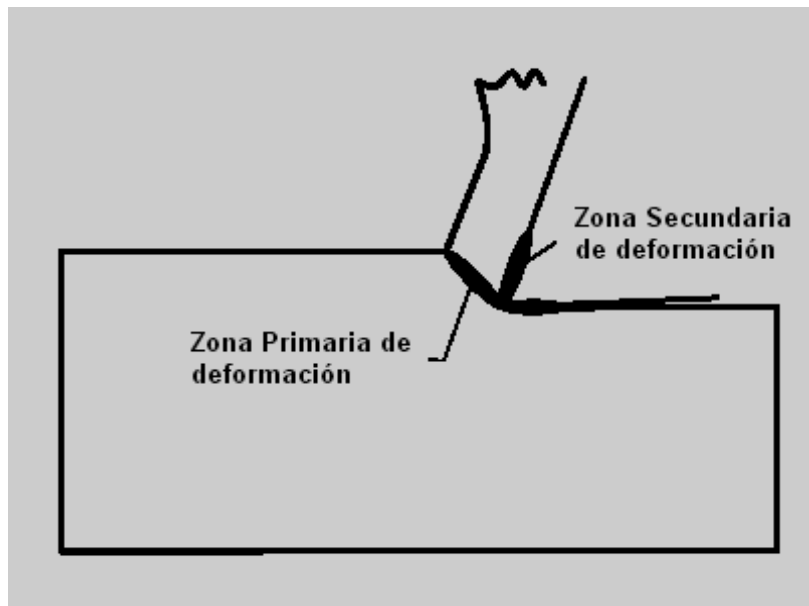


Figura 14: Zonas primaria y secundaria de deformación (Åmstrom, 2004)

Otros autores añaden una tercera zona de deformación producida por el rozamiento entre la cara de incidencia (o de holgura) de la herramienta y la zona ya mecanizada de la pieza como se puede ver en la Figura 15.

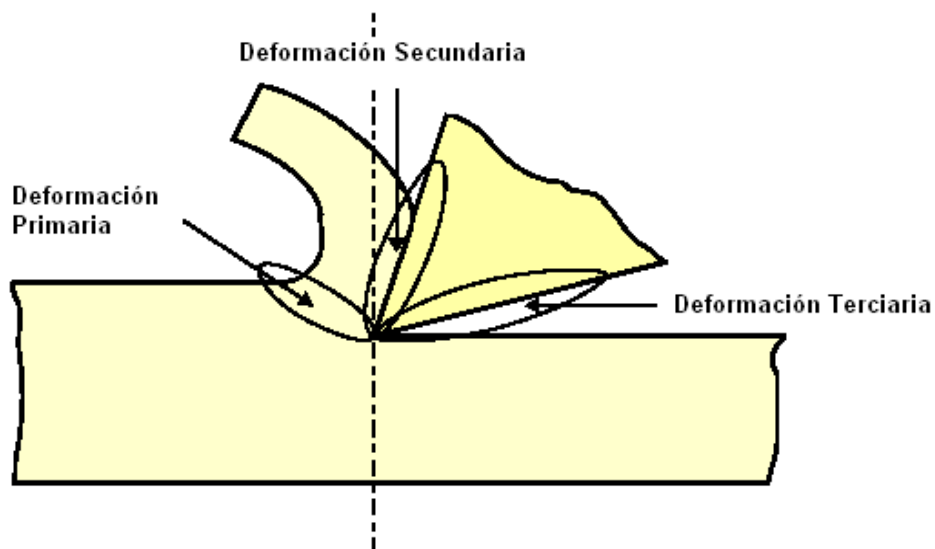


Figura 15: Zonas de deformación: primaria, secundaria y terciaria (Groover, 1997)

El punto de máxima temperatura se encuentra en la superficie de desprendimiento como se verá en el modelo analizado.

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

2.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

INTRODUCCIÓN

En este punto se comentan los aspectos más relevantes a tener en cuenta de la simulación mediante elementos finitos donde en un primer lugar se comentarán los aspectos teóricos del método de elementos finito a nivel general. Después se focalizará en lo relativo a la simulación realizada con el programa DEFORM 2D.

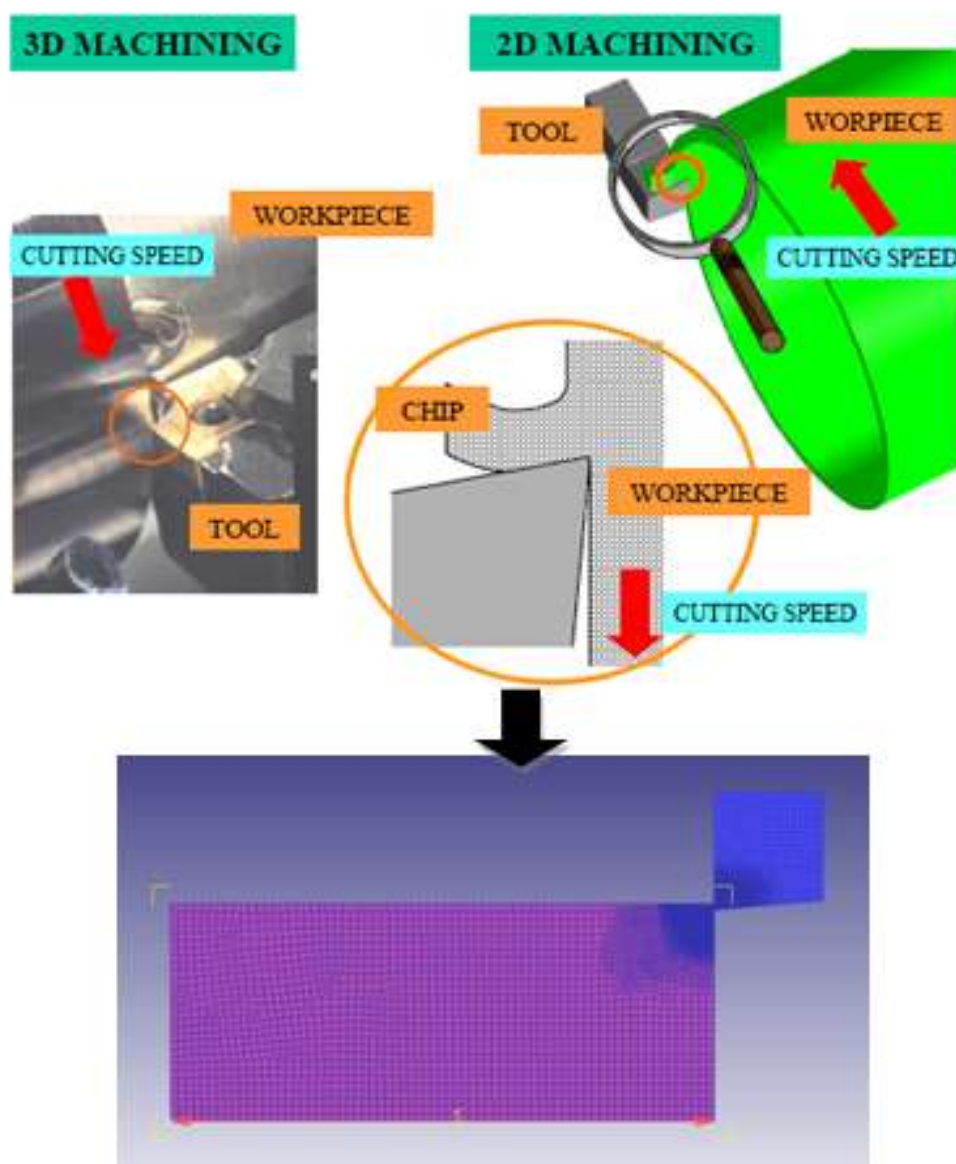


Ilustración 1: imágenes orientativas del paso del proceso real a la simulación

PRINCIPIOS GENERALES

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método de cálculo numérico basado en ecuaciones diferenciales para resolver problemas relacionados con la ingeniería. Para dar solución a un problema de ingeniería basándose en el Método de Elementos Finitos, se deben tener en cuenta las siguientes asunciones:

1. Una función continua se aproxima a una serie de funciones finitas y mediante ese número finito de funciones se puede llegar a una solución equivalente de la función continua.
2. El objeto a estudiar estará dividido en subdominios a los que se denomina “elementos”

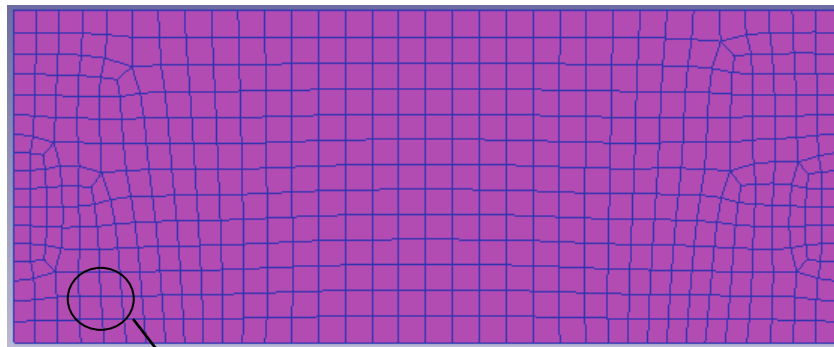


Figura 16: pieza de dimensiones 5 mm x 2 mm dividida en 500 elementos

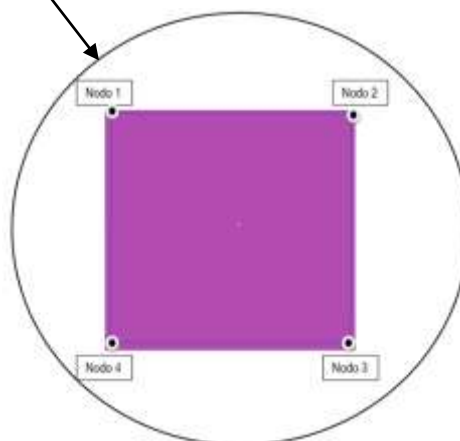


Figura 17: elemento definido por los nodos 1, 2, 3 y 4

3. Estos elementos estarán definidos mediante puntos y conexiones llamados “nodos” (ver figura anterior)



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

4. La unión en una pieza de todos sus nodos y elementos es a lo que se denomina “mallado”, por lo tanto “mallar” una pieza significa crear los subdominios que van a definir a la misma.
5. Las funciones continuas definidas son resueltas en cada nodo, asumiendo que cualquier punto interno al elemento puede calcularse como variables nodales del elemento.
6. Como variables nodales entendemos los grados de libertad de los nodos: tres grados de desplazamiento y tres grados de rotación.
7. La suma de todos los elementos representa el objeto de estudio, al que se llama cuerpo mallado, consiguiendo una gran aproximación con la realidad a la hora de realizar el estudio de los elementos finitos.
8. Las figuras formadas por formas geométricas y que no se encuentren malladas, serán llamados cuerpos rígidos.

En un análisis estructural, el Método de Elementos Finitos ensambla una serie de elementos entre sí conectándolos a través de nodos hasta representar la geometría a estudiar.

Cada elemento contiene las propiedades del material, de manera que se supone un comportamiento simplificado dentro de los mismos.

Cada elemento interacciona con sus elementos vecinos mediante una serie de ecuaciones que llevan como variables las incógnitas del problema a estudiar. Estas ecuaciones serán lineales o no dependiendo de las propiedades definidas del material y las condiciones de contorno del problema. Resolviendo cada una de las ecuaciones dentro de los elementos, se obtiene la solución global del problema.

El principio del Método de Elementos Finitos se remonta a los años 50, aunque no fue hasta la década de los 70 cuando las teorías basadas en MEF empezaron a ser usadas para simulaciones (Åmstrom, 2004).

La historia de la tecnología basada en elementos finitos se puede dividir en cuatro fases. En el primer periodo, este método fue aplicado fundamentalmente en problemas mecánicos



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

estructurales. Ya a finales de los 70, en una segunda fase del desarrollo del MEF, métodos numéricos empezaron a usarse para simulaciones de corte. En un tercer periodo los investigadores se centraron en crear nuevos métodos para solucionar problemas de mayor dificultad, como calculo de flujos. El cuarto periodo, desarrollado actualmente, trata de optimizar los algoritmos creados y su comercialización.

Özel (2005) afirma que la ventaja de los modelos de simulación basados en MEF consiste en su potencia para predecir desgastes y fracturas tanto en la herramienta de corte como en la superficie de la pieza mecanizada. Sin embargo otros autores como Umbrello et al. (2006) aportan varios puntos débiles a las simulaciones de corte por el Método de Elementos Finitos, ya que las estimaciones del desgaste en formas complejas y la correcta estimación de gradientes térmicos no son totalmente fiables en estas simulaciones. No obstante y según afirma el mismo autor, actualmente se están llevando a cabo numerosas investigaciones en este campo y los progresos son remarcables, siendo este método la herramienta más popular en el análisis mecánico, debido principalmente a su bajo costo frente a los métodos experimentales.

Desde el punto de vista industrial los propósitos a la hora de usar el MEF son los siguientes (Åmstrom, 2004).

- Para analizar el impacto durante el uso. Los productos industrializados sufren de diversos daños debidos al uso operacional. El propósito del MEF es el del predecir ese desgaste y así mejorar el diseño del producto final.
- Para analizar el impacto de las operaciones de manufactura sobre el material estudiado. A la hora de elegir material, se debe tener en cuenta las operaciones que se van a realizar sobre la estructura original, como puede ser mecanizado, tratamientos superficiales, soldaduras, etc.
- Para optimizar las operaciones de manufactura. Así mismo, gracias a las herramientas MEF se puede predecir el efecto de dichas operaciones sobre la materia prima, pudiendo así optimizar el proceso aun antes de que se haya comenzado.

El estudio del proceso de manufactura para el diseño de un producto es lo que se conoce como Virtual Manufacturing (VM) o Fabricación Virtual. En esencia, el propósito de VM es poder realizar la manufactura del producto mediante simuladores por ordenador, teniendo en cuenta todas las posibles variables que ocurran en el futuro entorno de manufactura real.



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

Las ventajas de usar VM antes de proceder a la manufactura de un producto son varias:

- La necesidad de un menor número de prototipos. Cuantas más simulaciones se realicen, menos prototipos físicos se tendrán que hacer, ya que se estará más próximo a un modelo válido.
- El punto anterior da lugar a un menor gasto de material y un menor desgaste de las herramientas de manufactura.
- Disminución de los ciclos de tiempo de los productos. Gracias al VM el producto se lanza con una mayor rapidez al mercado.
- El precio total de la manufactura del producto disminuye, al hacerse una gran parte de las pruebas con simulaciones, en lugar de sobre prototipos físicos.

El uso del análisis por el Método de Elementos Finitos ha ido aumentando de manera asombrosa en los últimos años. Esto se debe a que es una herramienta esencial para realizar los análisis y simulaciones dentro de la Fabricación Virtual.

Hasta los años 80, la especialización de departamentos y su consiguiente aislamiento del resto de la empresa era lo que primaba en la industria de todo el mundo. No fue hasta 1990 cuando se empezó a usar el concepto de “reingeniería”, donde se encuentra integrada la Fabricación Virtual. Esta técnica apoya los movimientos interdepartamentales a la hora del diseño de un producto, de manera que diseño, producción y comercio aporten algo a ese diseño.

Adams (1999) brinda además una importancia al MEF en el área del ciclo de desarrollo del producto. Al realizar simulaciones antes de proceder a la fabricación real del producto, se aporta un conocimiento de la respuesta del material y del producto que de otro modo no tendríamos.

Esta reducción del espacio de desconocimiento se convierte en un potencial para ahorrar tiempo y costes en etapas posteriores del producto.

El abaratamiento de los equipos informáticos ha contribuido a que la difusión de las herramientas de elementos finitos crezca de manera increíble, de forma que cualquier oficina técnica, por pequeña que sea, las puede tener a su alcance.



Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

2.7 MATERIAL INCONEL 718

El Inconel 718 es una aleación relativamente reciente, ya que su invención data de 1959 y su uso industrial empieza alrededor de 1965. Es una aleación endurecible por precipitación, que contiene una cantidad significativa de hierro, niobio y molibdeno y menores cantidades de aluminio y titanio.

Combina resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica. Además esta aleación tiene muy buena resistencia a la rotura a temperaturas de hasta 700°, su límite elástico es elevado y se mantiene hasta esta temperatura. Su resistencia a los coques y su tenacidad son bastante buenas así como su resistencia a la corrosión en caliente.

Se utiliza en turbinas de gas, motores de cohetes, aeronaves, bombas, en la fabricación de componentes de turborreactores (discos de turbinas y ejes).

En cuanto a su comportamiento frente al mecanizado, debido a las altas sollicitaciones termo-mecánicas que debe soportar, la integridad superficial de las superficies mecanizadas resulta de gran importancia, por lo que las tensiones residuales superficiales son un aspecto a tener en cuenta. Esto es un tema que se lleva analizando años y es de gran relevancia tanto en el campo industrial como en el científico

En la siguiente tabla se muestra la composición química del mismo.

Tabla 1: composición química aproximada del Inconel 718

Composición química aproximada	
Ni + Co	50 - 55%
Cr	17 - 21%
Fe	Resto
Nb + Ta	4,75 - 5,5%
Mo	2,8 - 3,3%
Ti	0,65 - 1,15%
Al	0,2 - 0,8%

Capítulo II. Antecedentes / Estado del Arte

Tabla 2: datos sacados del informe “Predicción de tensiones residuales en el torneado de Inconel 718” de la Escuela Politécnica Superior de Mondragón Unibersitateat, Dpto. de Mecánica y Producción Industrial.

PARAMETRO			Valor
MATERIAL	Ley de Fluencia Johnson-Cook (Inconel718)	Coefficiente A (MPa)	1241
		Coefficiente B (MPa)	622
		Coefficiente n	0.6522
		Coefficiente C	0.0134
		Coefficiente m	1.3
	% energía plástica transformada en calor (β)		0.9
	Densidad (ρ) ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Pieza (Inconel 718)	8221
		Herramienta (P10)	10600
	Elasticidad (Inconel 718)	Módulo de Young (E)($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	212e09
		Coefficiente de Poisson (ν)	0.294
	Conductividad térmica (λ)($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Pieza (Inconel 718)	12 (293K) 24 (1173K)
		Herramienta (P10)	25
	Calor específico (c)($\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Pieza (Inconel 718)	440(293K) 680(1173K)
		Herramienta (P10)	200
CONTACTO	Coefficiente de expansión térmica (Inconel718)		1.2e-5(293K) 1.7e-5(1193K)
	Conductancia térmica (K_t)($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)		10e8
	Coefficiente de reparto de calor (Γ)		0.5
	Coefficiente de Fricción (μ)		0.23
	% energía de fricción transformada en calor (η)		1
CONDICIONES DE CORTE	Emisividad (ϵ)		0
	Radio de arista (r_h) (μm)		40
	Radio de la punta (R) (mm)		4
	Ángulo de desprendimiento (γ_n) ($^\circ$)		0
	Ángulo de inclinación (λ_s) ($^\circ$)		0
	Ángulo de incidencia (α_0) ($^\circ$)		7
	Profundidad de pasada (d.o.c.) (mm)		0,15
	Velocidad de corte (V_c) ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)		30/70
	Avance por vuelta (f) ($\text{mm}\cdot\text{v}^{-1}$)		0,15/0,25
	Material Herramienta		ISO P10
	Material Pieza		Inconel 718

CAPÍTULO 3:

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

CAPITULO III. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

3.1 INTRODUCCIÓN

Hasta ahora se ha estudiado el proceso de corte se ha visto su modelización desde un marco teórico y se va proceder a la creación del modelo numérico con el software DEFORMTM - 2D

Tras concebir el modelo con todas las características y condiciones requeridas para simular el proceso deseado (que se detallan más adelante), se llevará a cabo la simulación para analizar en detalle todas las variables deseadas. Para ello, como es común en los programas de elementos finitos, se usa un Pre-Procesador para definir todas las variables iniciales, después está el procesador, donde se simula el modelo, y por último está el Post- Procesador, donde se analizan los datos obtenidos.

El modelo de elementos finitos para el corte ortogonal está compuesto por la pieza a cortar que se considera de tipo elastoplástica y la herramienta, plaquita o inserto que puede considerarse rígida o deformable según interese al investigador que realice las simulaciones y los resultados que pretende analizar. En este caso la herramienta se va a considerar tipo rígida.

Para la creación del modelo se utiliza un software en 2D ya que se considera tensión plana, donde la profundidad de pasada es mucho mayor (del orden de 20 veces) que el avance de la herramienta. Como ejemplo académico, se puede poner el caso de un túnel, donde nos interesan principalmente las fuerzas radiales y circunferenciales en ejes (x e y, 2D) y no las cargas en la dirección de la generatriz del túnel (eje z).

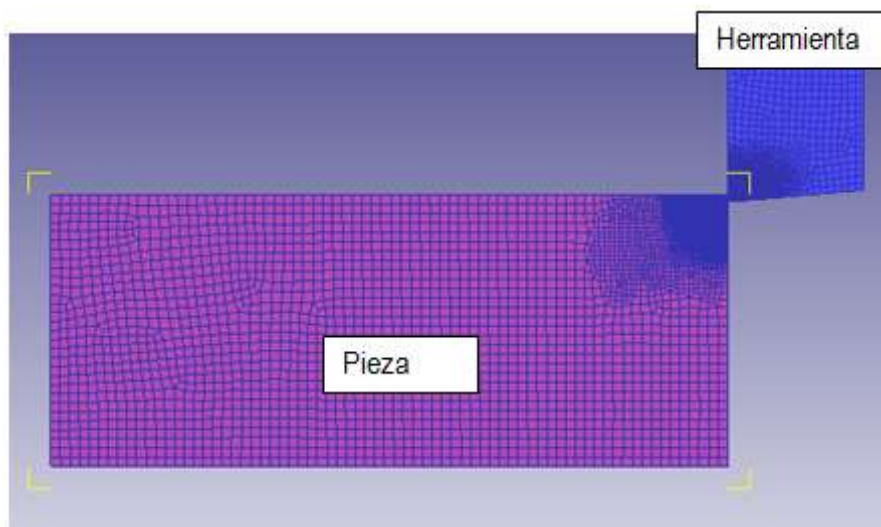


Figura 18: elementos constituyentes del modelo



Capítulo III. Modelo de elementos finitos

El material de la pieza a tratar es el INCONEL 718 y las dimensiones de la misma son 5mm x 2 mm con una profundidad de 2mm. En el caso de la herramienta, se tiene que el material es WC (Carburo de Wolframio), que se trata de un metal duro. La geometría de la herramienta tiene un ángulo de desprendimiento de 0° , un ángulo de incidencia de 5° y un radio de arista de corte de 0,02mm.

Más adelante se detallará lo relativo a estos dos elementos.

En la simulación a realizar, se realizarán dos pasadas para cada caso generado a partir de los valores de velocidad de corte y avance dados. El motivo de realizar dos pasadas es para poder realizar un mejor análisis del comportamiento termomecánico del material ajustándolo más a la realidad.

3.2 ETAPAS DE DESARROLLO DEL MODELO

PARÁMETROS GENERALES DEL PROCESO DE CORTE

Antes de comenzar la definición de los elementos constitutivos del proceso de corte ortogonal a simular, se introducen una serie de parámetros iniciales (velocidad de corte, avance, condiciones de contorno, etc.), que el sistema necesita para general un modelo base.

Primeramente se selecciona el sistema de unidades que se va a utilizar, que será el SI (Sistema Internacional) en este caso.

Tenemos que en la simulación se han realizado modelos correspondientes de dos pasadas de corte en las siguientes condiciones:

$T = 20^\circ\text{C}$

$V_c = 50 \text{ m/min}$ y 100 m/min

$\text{Avance} = 0,1 \text{ mm/rev}$ y $0,05 \text{ mm/rev}$

$\text{Profundidad} = 2 \text{ mm}$

$\text{Coeficiente de transferencia de calor} = 45 \text{ N/(s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C)}$

Coeficiente de rozamiento por Coulomb 0,8 para la zona de contacto viruta herramienta y 0,4 para la zona de contacto superficie mecanizada-herramienta.

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

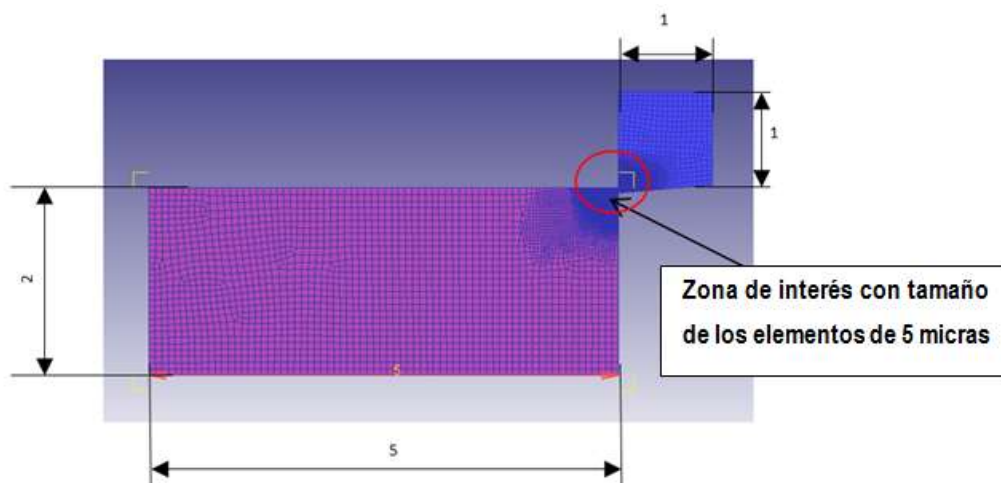


Figura 19: esquema básico del modelo

Propiedades del INCONEL 718 y del WC.

Se ha utilizado la ecuación característica de los materiales, proporcionadas por la AMTC (Aerospace Manufacturing Technology Centre) en el caso del INCONEL 718, y para el caso del WC se ha utilizado la librería del propio programa DEFORM 2D.

DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA HERRAMIENTA

Una vez definidas las condiciones generales del proceso de corte, se necesita definir la geometría y los materiales de la herramienta a utilizar y de la pieza a mecanizar. Se puede seleccionar un material existente en la librería del DEFORM 2D, crear uno nuevo o bien importar un material.

Geometría de la herramienta:

Tabla 3: parámetros de la geometría de la herramienta

Ángulo de desprendimiento	0°
Ángulo de incidencia	5°
Radio de la arista de corte	0,02 mm

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

Material:

Se selecciona el tipo de material. En este caso, el material de la herramienta va a ser WC (Carburo de Wolframio), correspondiente a un metal duro. El metal duro es un material de corte hecho con partículas duras (fundamentalmente de carburos de wolframio) unidas con un aglomerante mediante técnicas pulvimetalúrgicas. Comparados con las herramientas de acero rápido, presentan durezas muy superiores, menor tenacidad y precios superiores. El programa selecciona por defecto que se trata de un material tipo “rígido” que es con el que se va trabajar.

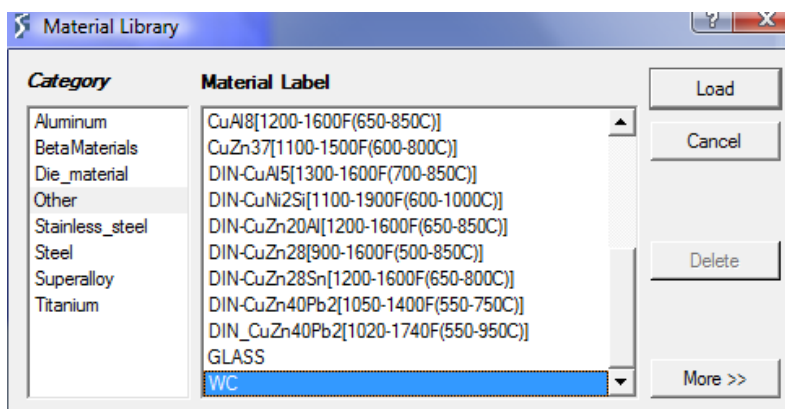


Figura 20: cuadro de selección del material de la herramienta

Tabla 4: propiedades del WC (Carburo de Wolframio)

Propiedades Físicas del WC	
Densidad (g/cm ³)	15,7
Punto de fusión (°C)	2800-2870
Propiedades Mecánicas	
Coefficiente de Poisson	0,25
Dureza Rockwell A	90
Módulo de Elasticidad (GPa)	650
Resistencia a la Tracción (MPa)	344

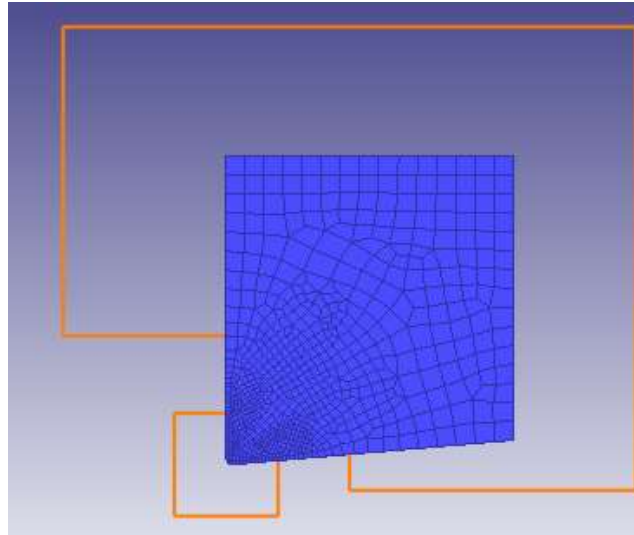


Figura 21: herramienta con sus correspondientes ventanas de mallado

Para aprovechar mejor la potencia de cálculo del motor de la simulación, se crean unas ventanas donde se escoge un mallado menos denso para la zona que menos participa en el proceso y un mallado mucho más fino en la zona de contacto con la pieza, que es la que realmente interesa para el proceso.

Se ha procedido a realizar diversas simulaciones para su posterior análisis, utilizando una geometría de herramienta con redondeo de filo 0,02mm de valor constante para todos los casos y un ángulo de incidencia de 5° y un ángulo de desprendimiento de 0° .

DEFINICIÓN DE LA PIEZA A MECANIZAR:

Geometría de la pieza:

Se trata de una pieza de dimensiones 5 mm x 2 mm. Se define en el programa a través de una ventana interactiva. Ver Figura 22. Con estas dimensiones se asegura que las condiciones de contorno impuestas a la pieza no afectarán a la zona de corte.

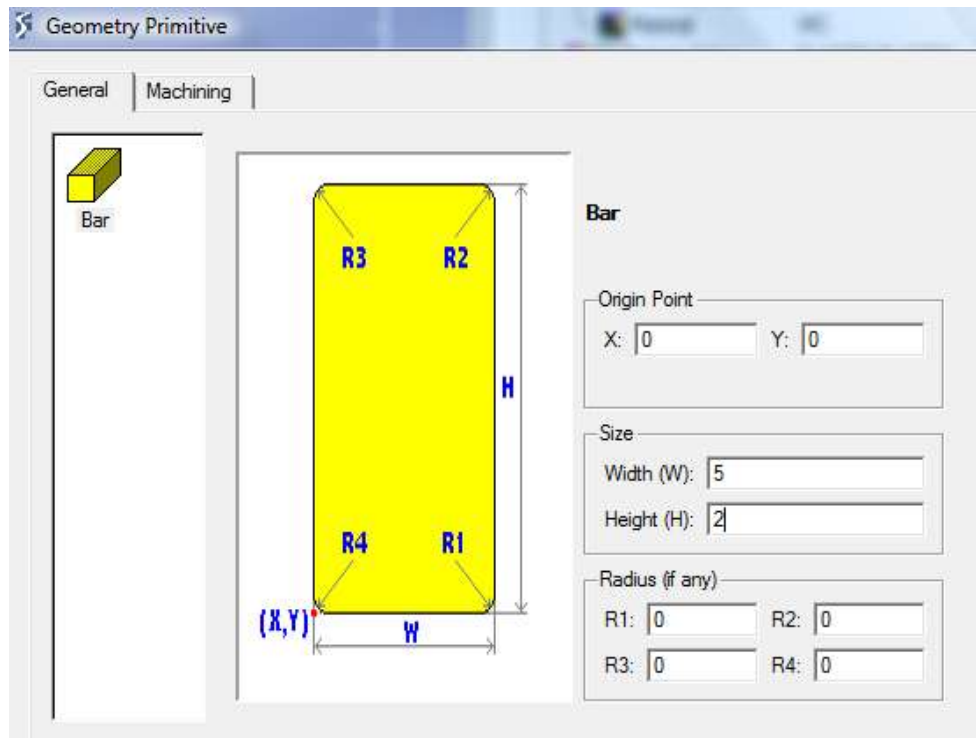


Figura 22: ventana interactiva para definir la geometría de la pieza a mecanizar

Material de la pieza:

El material INCONEL 718 se importa al programa, utilizando un archivo específico para mecanizado de la AMTC. También existe dicho material en la librería del DEFORM 2D, pero tras realizar varios ensayos, se ha procedido a usar este, al estar estandarizado y observar se comporta mejor. Durante la simulación el INCONEL 718 se trata como un material elastoplástico, donde se considera la recuperación elástica del material y las deformaciones debidas a la expansión térmica. Esto es necesario para el cálculo de las tensiones residuales y para simular de forma realista el proceso. El hecho de utilizar estas condiciones implica un mayor tiempo de cálculo.

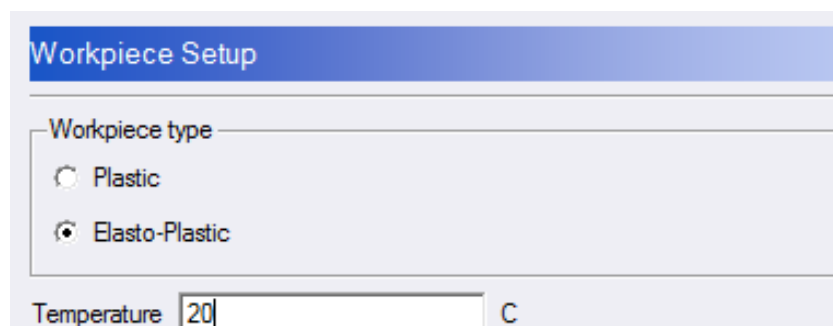


Figura 23: cuadro de diálogo para seleccionar el comportamiento del material

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

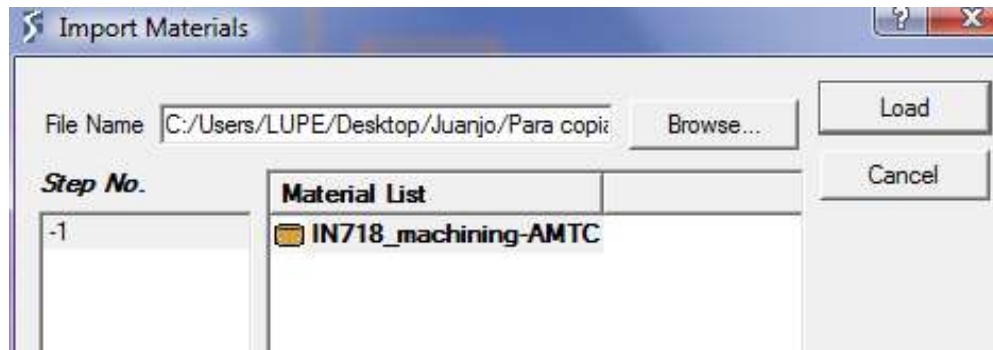


Figura 24: ventana de selección del material de la pieza a mecanizar

Cabe señalar, que al haber importado el material y no haber creado uno nuevo, ya viene definida la ecuación constitutiva del material y todo lo referente al comportamiento del mismo.

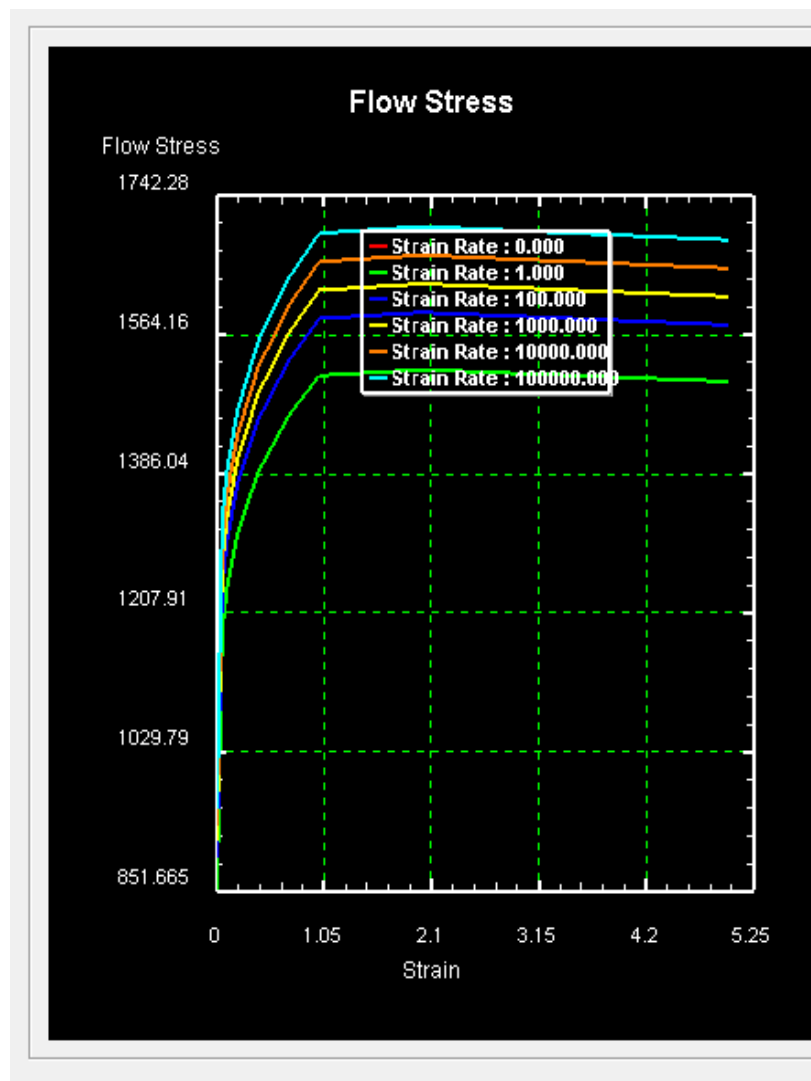


Figura 25: datos relativos a la ecuación constitutiva del material (gráfica tensión-deformación para distintas temperaturas y velocidades de deformación)

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

CONDICIONES DE MECANIZADO

El modelo representado en el software es bidimensional, con deformación plana y con los ejes orientados de la siguiente manera:

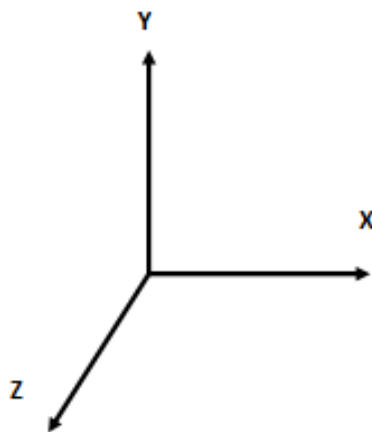


Figura 26: ejes de coordenadas

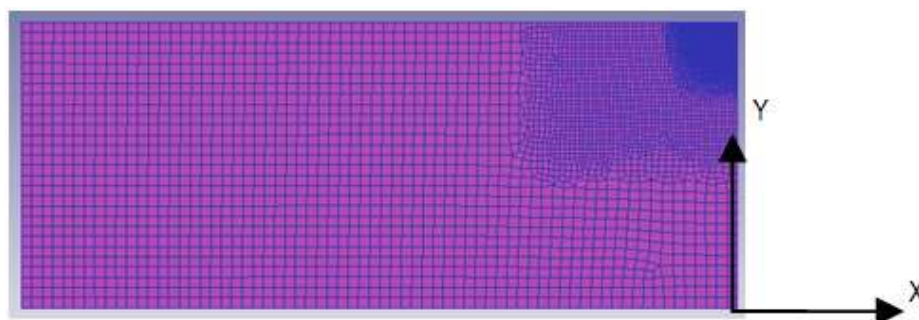


Figura 27: vista de la pieza en 2D con los ejes de coordenadas

Tabla 5: condiciones de corte

Velocidad de corte (m/min)	50 y 100
Avance (mm/rev)	0,1 y 0,05
Profundidad de pasada (mm)	2
Longitud a mecanizar (mm)	5

Capítulo III. Modelo de elementos finitos



Después de haber seleccionado estos parámetros iniciales, se pasa a introducir las **condiciones de contorno**, donde hay que tener en cuenta que es la pieza la que se mueve (en la dirección X) y la herramienta está quieta.

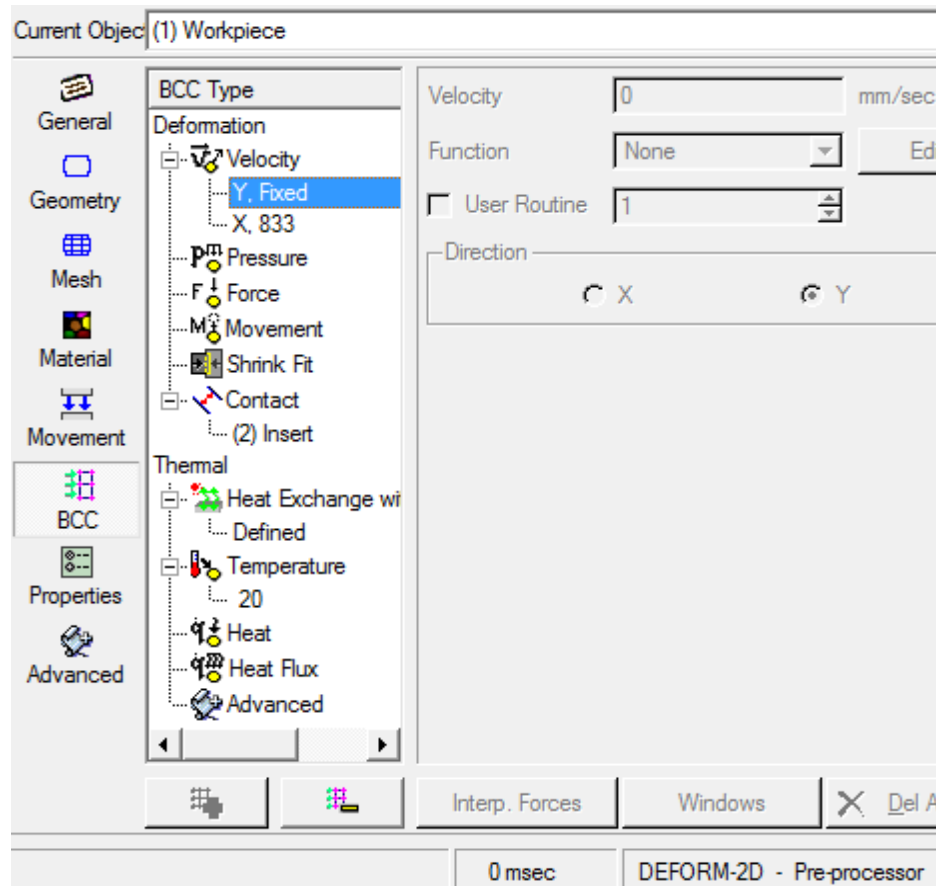


Figura 28: ventana interactiva para definir las condiciones de contorno a la pieza y herramienta

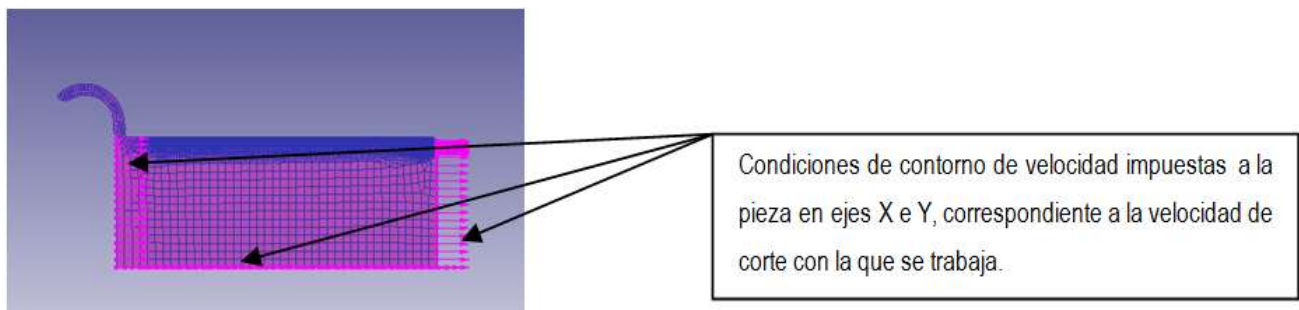


Figura 29: condiciones de contorno para movimiento de la pieza

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

Condiciones de transferencia de calor: coeficiente de convección o de película de 0,08 (N/(s·mm·°C)) en superficie libre. Dicho valor es propio de convección forzada al aire (correspondiente por ejemplo a un torneado en el que la pieza realiza el movimiento de corte)

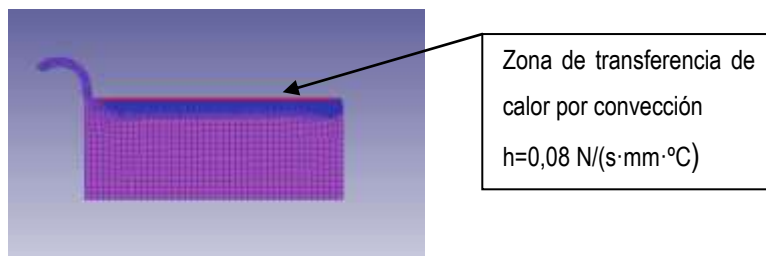


Figura 30: condiciones de contorno para transferencia de calor

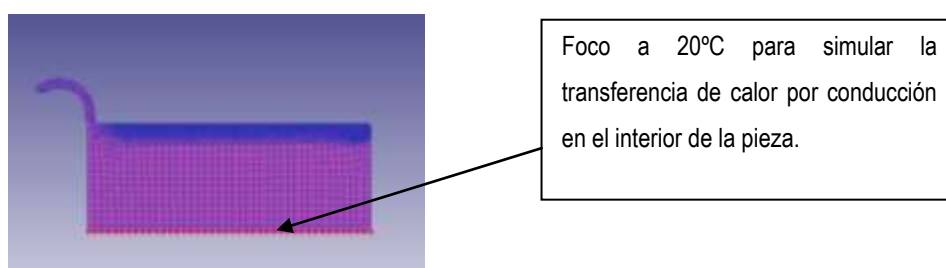


Figura 31: condiciones de contorno para transferencia de calor

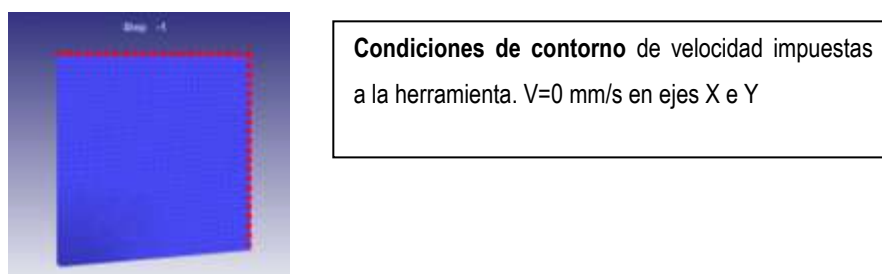


Figura 32: condiciones de contorno para movimiento de la herramienta

Cabe señalar que el posicionamiento de la pieza se realiza a través de un menú. Existe un menú en el módulo “Machining 2D cutting” que tiene una opción para el posicionamiento automático. Para posteriores análisis, como la retirada de la herramienta y colocación de la misma para una segunda pasada, se usará un menú del Pre-Procesador del DEFORM 2D (Figura 33b)

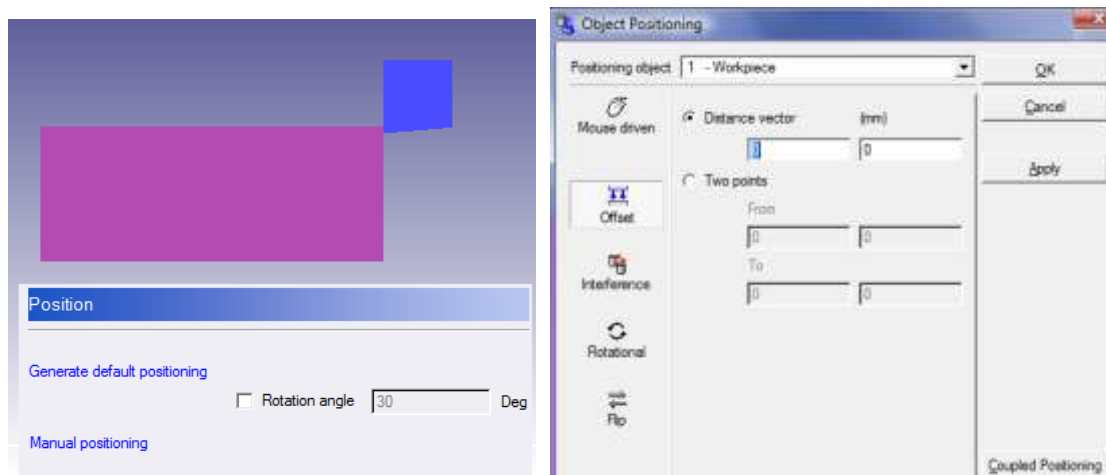


Figura 33: a) imagen de posicionamiento inicial de la pieza y herramienta; b) menú de posicionamiento de objetos

Existe un menú en el Pre-Procesador desde donde se controlan los parámetros de la simulación, tales como N° de pasos, tiempo por paso, coeficiente de transferencia de calor, criterios de convergencia.

TIEMPO POR PASO

Uno de los parámetros más importantes es el tiempo por paso.

Para calcularlo se tiene que hay que recorrer 5 mm, de forma que en cada paso se avance una distancia correspondiente a entre 1/2 y 1/3 del tamaño del elemento más pequeño, que es lo recomendado por el manual. En este caso trabajamos con elementos de 5 micras, que se trata de un valor adecuado para conseguir resultados buenos que se ajusten a la realidad y que hagan que estabilicen las componentes de los distintos parámetros de fuerzas, temperaturas, tensiones, etc. Con esto, esta distancia queda en 2micras (0,002mm) por paso. Debido a que el programa trabaja introduciéndole valores de tiempo por paso, utilizando la ecuación básica de la cinemática espacio es igual a velocidad por tiempo, $e = v \times t$, despejamos t, resultando $t = \frac{e}{v}$ de donde sabiendo que se trabaja con valores de velocidad de 833mm/s (50m/min), y 1667 mm/s (100m/min) se obtiene que se va a trabajar con tiempos de $2.4e^{-6} s$ y $1.2e^{-6} s$ respectivamente. Como se puede ver, en un caso tardará la mitad que en el otro.

Todo esto se va a realizar en una simulación de 2500 pasos, ya se avanza 0,002mm por paso para recorrer los 5mm de longitud a mecanizar. Estos valores permanecen para todas las simulaciones. Hay que señalar que esto corresponde a valores teóricos, y durante la simulación

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

se ha trabajado con algo más que este valor, ya que al trabajar con un material elasto-plástico, existe recuperación elástica, y se necesitan más pasos para mecanizar toda la pieza.

$$N^{\circ}pasos = \frac{5mm \text{ (longitud de la pieza)}}{0.002mm \text{ (avance por paso)}} = 2500 \text{ pasos}$$

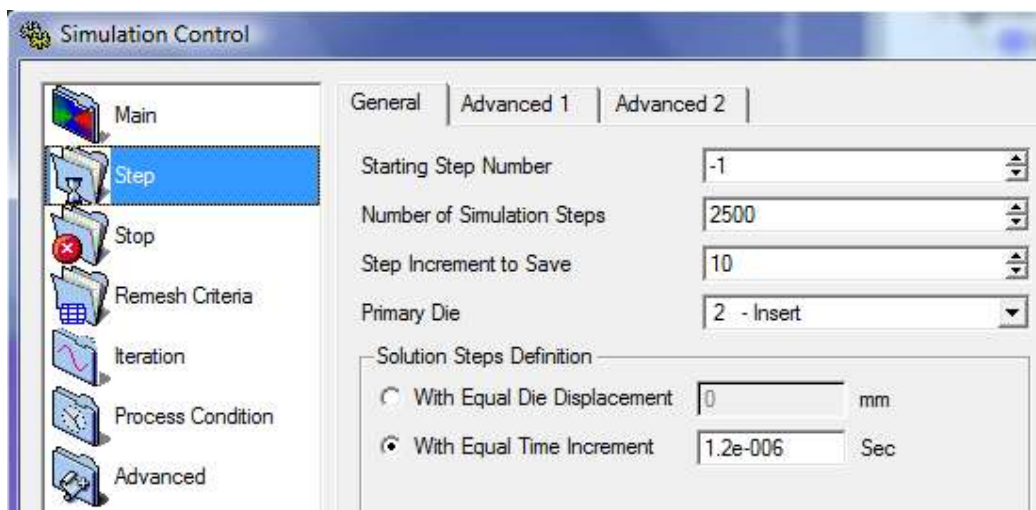


Figura 34: menú de control de parámetros de la simulación

LEYES DE FRICCIÓN HERRAMIENTA PIEZA.

Se ha considerado que la ley de fricción más adecuada para esta simulación es la Ley de fricción tipo Coulomb con coeficientes de rozamiento constantes de valor $\mu=0,8$ para la zona de contacto viruta-herramienta y de valor $\mu= 0,4$ para la zona de contacto superficie mecanizada-herramienta.

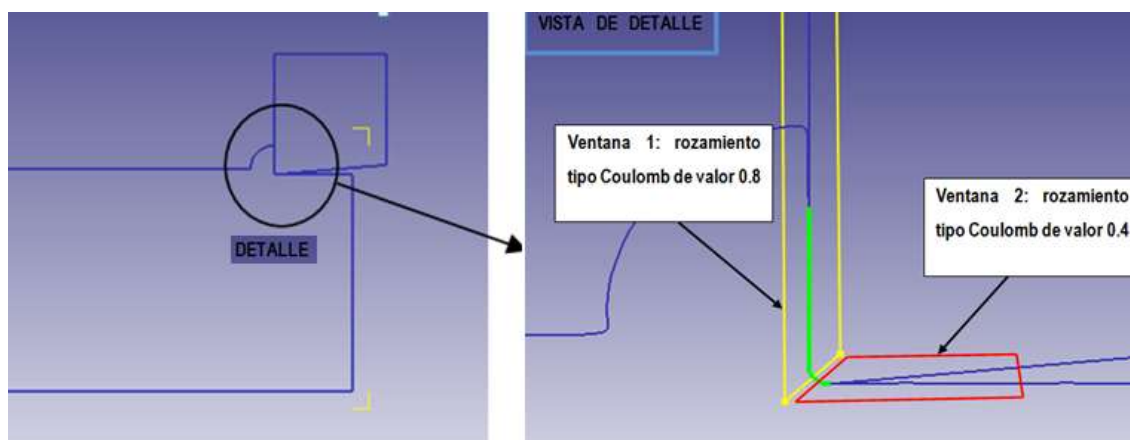


Figura 35: imagen referente a las zonas de contacto



Capítulo III. Modelo de elementos finitos

MALLADO

Definir bien la malla es de gran importancia, ya que en base a ella nuestro modelo numérico trabajará y arrojará unos resultados más o menos precisos. El programa permite definir ventanas de mallado local, definiendo así nuestras zonas de interés con una mayor densidad de elementos. Esto ayuda a optimizar los recursos del sistema, ya que en las zonas que no interesan se puede usar un mallado más basto. Existe un compromiso entre el número de elementos del mallado y el tiempo de duración de la simulación, ya que al aumentar el número de elementos aumenta la precisión de los resultados pero se ralentiza el proceso, por lo que para obtener un mallado óptimo se han realizado estudios anteriores con diferentes mallados de pieza y herramienta hasta encontrar la densidad mínima a partir de la cual los resultados de la simulación no varían.

En este caso se trabaja con un mallado donde el tamaño del elemento es de 0,005 mm en la región de mayor interés, que abarca la zona de contacto virtual herramienta y la zona de cizalladura del material de la pieza. En la zona mecanizada se trabaja con un mallado donde el tamaño del elemento es de 0,01 mm, ya que interesa que esa zona arroje unos resultados precisos de cara a las tensiones residuales, además que este material se mecanizará en la segunda pasada. Interesa no mallar basto para no perder información de gradientes térmicos. Por último para el resto de la pieza se utiliza un mallado de 0,07 mm.

Como se muestra en la Figura 36, se tiene:

- La ventana 1 de mallado fino en la zona de corte y contacto entre la herramienta y el material. Los elementos iniciales en esta zona tienen entre 4 y 5 μm de lado. Esto es algo que hay que gestionar para que los valores de los datos obtenidos (entre ellos la fuerza de corte y avance) sean valores lo más constantes posibles y no sufran demasiadas oscilaciones, lo que se conoce como ruido.
- La ventana 2, donde se tienen la parte mecanizada de la pieza, con un tamaño de elemento de unos 10 μm (0,01mm), con una profundidad igual aproximadamente igual al avance de 0,1 mm
- La ventana 3 que contiene al resto de elementos de la pieza. Son elementos que no son de interés para obtener unos resultados precisos, con lo que su tamaño es mayor.

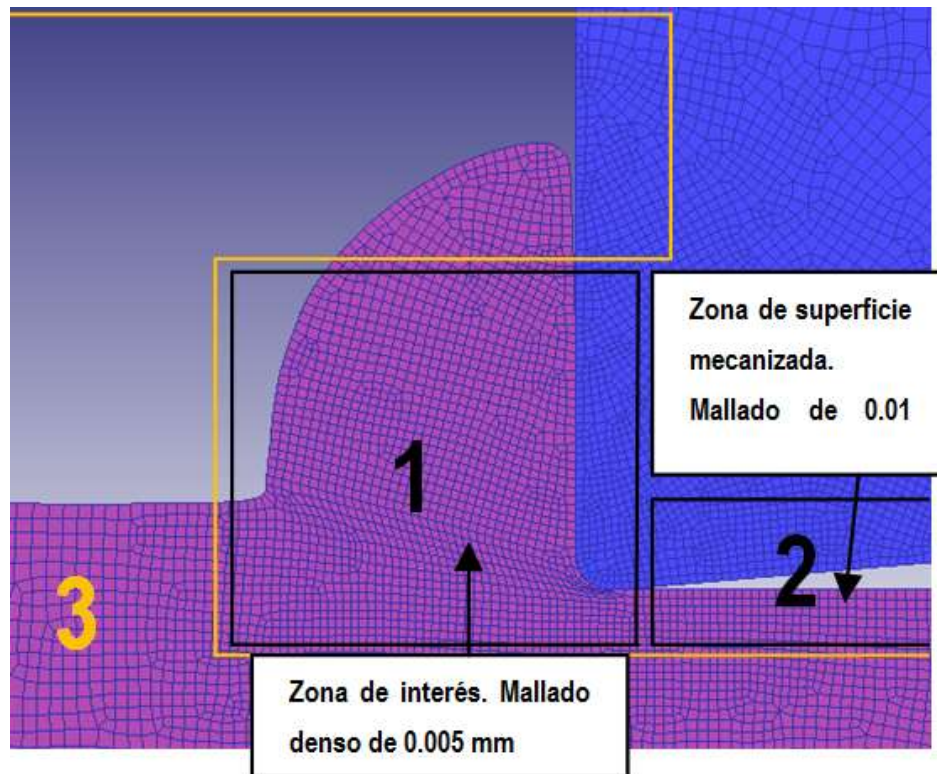


Figura 36: ventanas para definir la densidad de mallado en la pieza

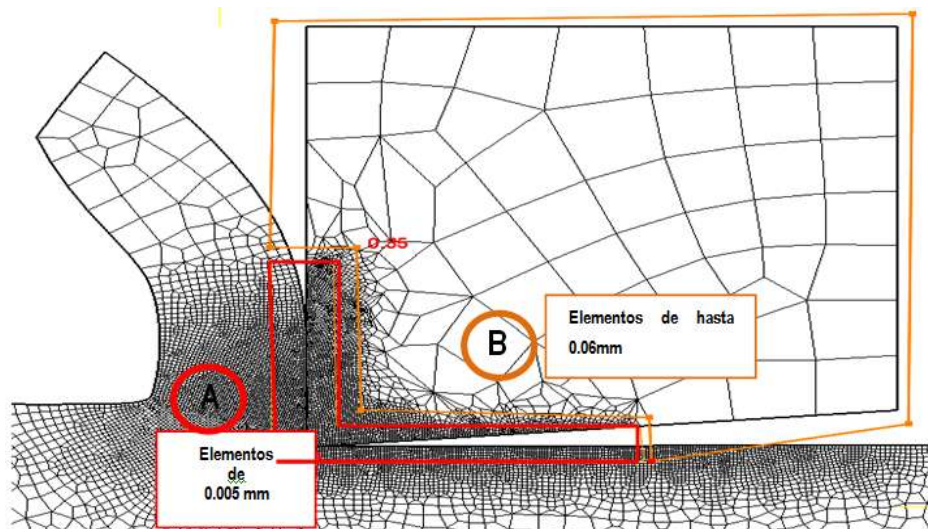


Figura 37: ventanas para definir la densidad de mallado en la herramienta

- La ventana A tiene elementos de $5\text{ }\mu\text{m}$. Dentro de esta ventana se encuentran las zonas de contacto de la herramienta con la pieza. Es importante que esta zona de la herramienta tenga un tamaño de elemento similar al de la pieza, ya que se ha comprobado que así funciona mejor el programa de cara a los cálculos que realiza.

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

- La ventana B que van aumentando progresivamente desde la ventana A hasta alcanzar 0,06 mm de lado.

En cuanto al número de elementos utilizados, se tiene:

Para la herramienta, alrededor de 3.000 elementos, y para la pieza alrededor de 10.000. En un principio, para la pieza se ha partido de 8.000 elementos, y según se han ido requiriendo más elementos, se ha ido aumentando hasta 10.000 o 11.000 elementos en algún caso cuando ha sido necesario para seguir manteniendo el tamaño del elemento crítico de 5 micras.

Para comprobar la viabilidad del mallado, se realizaron diferentes pruebas previas para comprobar que a partir de una densidad mínima, los datos arrojados por el programa eran constantes. El tiempo de procesado con este número de elementos ronda en el equipo utilizado ha rondado las 20 horas.

En la Figura 38 correspondiente a la fuerza de corte, se muestra a modo de ejemplo como hay un valor medio y apenas existe ruido. Esto es gracias al mallado denso. En el caso de la fuerza de avance se ha obtenido más ruido para la misma precisión del mallado.

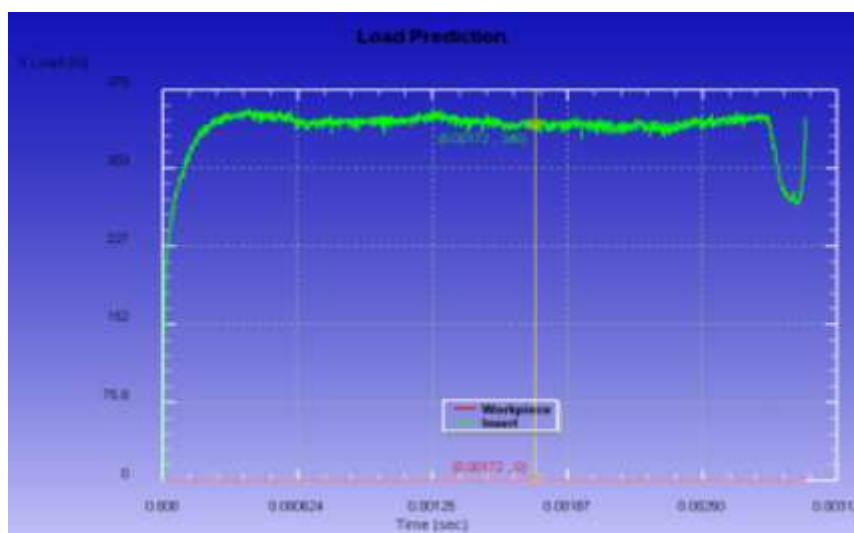


Figura 38: ejemplo de gráfica de la fuerza de corte con su componente estabilizada

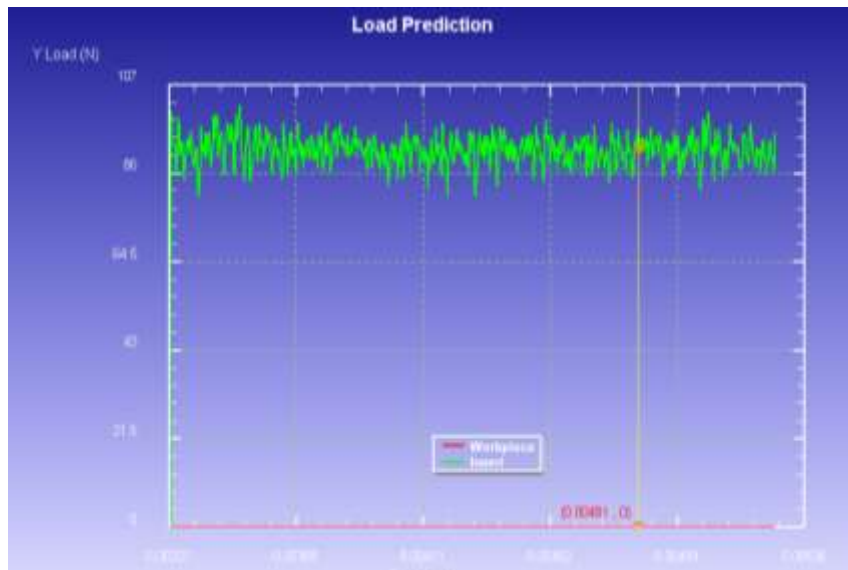


Figura 39: ejemplo de gráfica de la fuerza de avance con su componente estabilizada

MECANIZADO (1ª PASADA)

En el modelo presentado se mecaniza toda la superficie de la pieza (ver Figura 41), en este caso 5mm (la pieza tiene de dimensiones 5mm largo x 2mm de ancho) o en su caso hasta que la viruta se ha curvado lo suficiente o ha llegado a contactar con la pieza.

ENFRIAMIENTO TRAS PRIMERA PASADA

Como paso siguiente a este se procede a retirar la herramienta y a enfriar un poco la pieza, en un proceso con una duración de 0,1 segundos o la mitad, según trabajemos con velocidad de corte de 50 o 100 m/min, simulando el tiempo correspondiente que se podría tardar en dar una vuelta y el consiguiente enfriamiento por convección que se daría (usamos valor de 0,08 $N/(s \cdot mm \cdot ^\circ C)$), con un régimen de giro de 600 rpm, tal y como ocurriría en un proceso de torneado real. Cabe señalar que el valor usado de 0,1s es un valor a modo de ejemplo que podría ser otro, pero se ha comprobado que es suficiente para conseguir el efecto deseado de enfriamiento en la pieza.

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

Tras esto, la herramienta vuelve a su posición indicada, en este caso, al comienzo de la pieza en su extremo derecho, que es el punto de partida. Después de esto, donde tenemos la pieza tras una primera pasada y con la herramienta retirada, se procede a continuar con la generación de dos modelos distintos.

MEDIDA DE TENSIONES RESIDUALES

En el modelo A se enfría la pieza hasta alcanzar temperatura ambiente (20°C) en toda la pieza (ya que en este caso no se va a mecanizar más) para posteriormente medir las tensiones residuales de la pieza en la superficie mecanizada. Aquí se utilizan incrementos de tiempo altos, para que se produzca el enfriamiento y una duración del proceso adecuada para que la pieza alcance una temperatura homogénea de 20°C .

En el modelo B, se realiza una segunda pasada (ver figura Figura 42 y Figura 43), donde tras la misma, se procederá a retirar la herramienta y enfriar hasta la temperatura ambiente para posteriormente medir las tensiones residuales, igual que se hizo en el modelo A.

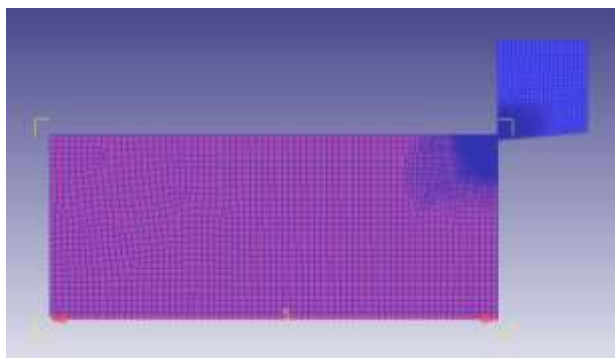


Figura 40: colocación pieza-herramienta para primera pasada

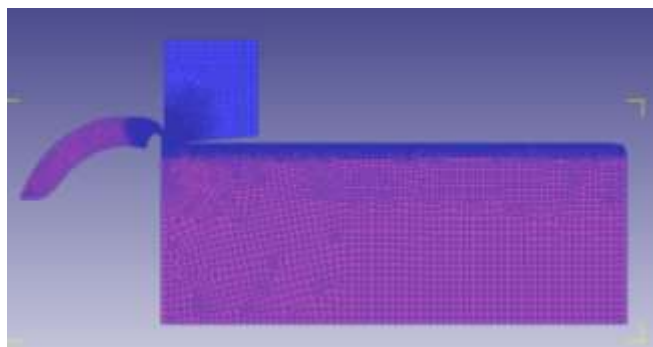


Figura 41: fin de primera pasada

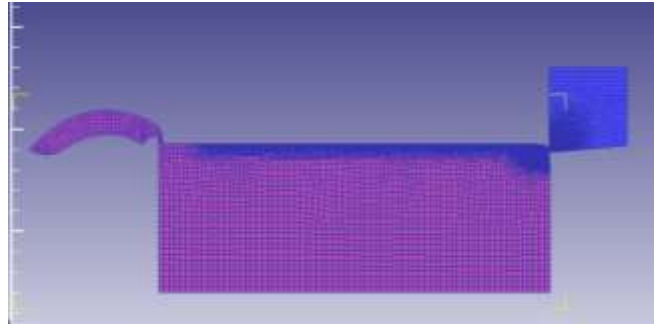


Figura 42: colocación herramienta para segunda pasada

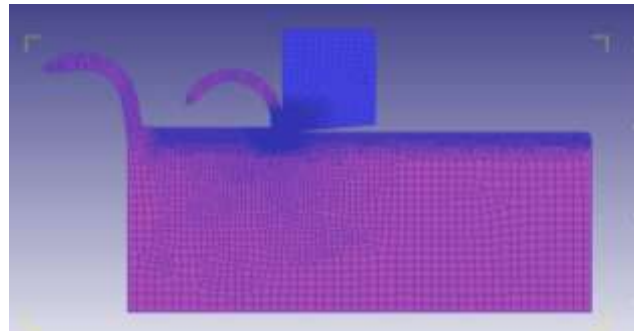


Figura 43: fin de segunda pasada

En la parte de procesamiento se lleva a cabo la simulación del modelo definido, para su posterior visualización. Es en esta fase, en la que el software realiza el cálculo numérico basándose en condiciones impuestas en el preprocesado.

Como se comentó anteriormente en el epígrafe referente al mallado, el programa puede dar errores durante la simulación, normalmente relacionados con el mallado, cuando está remallando, por la distorsión que se produce en los elementos, o por una interferencia excesiva entre pieza y herramienta, que o bien resuelve el programa automáticamente o bien requiere un remallado manual.

En el post-procesado se lleva a cabo la presentación de los resultados obtenidos tras la simulación realizada en la fase anterior, que permitirá el análisis que se mostrará en el siguiente apartado de análisis de resultados. Esta sección del programa, es la que permite un análisis más exhaustivo de los valores de los distintos parámetros de interés, tales como fuerza de corte obtenidos, donde se visualizan los valores mediante gráficos dan idea de la evolución de dichos parámetros en el tiempo. También permiten mostrar la distribución de presiones, temperaturas, tensiones, deformaciones, velocidades de deformación, etc. en el componente a lo largo de todo

Capítulo III. Modelo de elementos finitos

el proceso de mecanizado, y en una zona específica como puede ser la zona de contacto viruta-herramienta, tal y como se muestra en el siguiente capítulo.

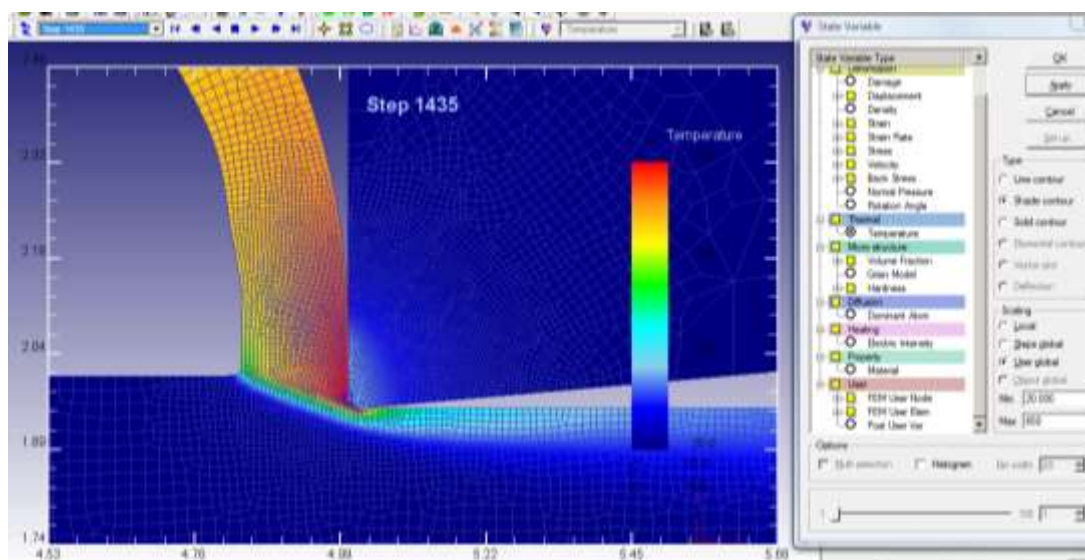


Figura 44: imagen ejemplo del post-procesador analizando temperaturas en la pieza



Capítulo III. Modelo de elementos finitos

3.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo, se ha recurrido a la búsqueda de diversas fuentes con el fin de obtener los valores de las fuerzas de corte específicas para así tener valores comparativos.

A partir de los dichos resultados se concluye que los valores obtenidos de la simulación son válidos y aportan unos resultados fiables de cara al estudio comparativo de los mismos.

Fuentes:

- Catálogo Sandvick Coromant 2009. Inconel 718 CMC 20.22. Fuerza específica de corte 3600 N/mm²

-Predicción de tensiones residuales en el torneado de Inconel 718. Escuela Politécnica Superior de Mondragón Unibertsitatea, Departamento de Mecánica y Producción Industrial.

Industria de turbopropulsores S.A. Parque Tecnológico de Zamudio.

Fuerza específica de corte de entre 4500 y 5500N/mm², con una profundidad de corte de 0,15mm (menor que la del modelo de estudio), por lo que es normal que la fuerza específica de corte sea mayor (en general la fuerza específica de corte crece al disminuir la sección de viruta)

-Resultados de la simulación realizada. Fuerza de corte específica= [2880,4185] N/mm²
f(avance)=0,1 mm/rev y 0.05 mm/rev; d (profundidad)=2 mm

Tabla 6: datos relativos a los resultados obtenidos en la simulación para fuerzas específicas de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	R. NUMÉRICO	RESULTADO	RESULTADO
<i>Vc (m/min)</i>	<i>a</i>	<i>Fc (1ª pasada)</i>	<i>Fc (2ª pasada)</i>	<i>Fuerza de corte específica 1ª pasada</i>	<i>Fuerza de corte específica 2ª pasada</i>
	<i>(mm/rev)</i>	<i>(N)</i>	<i>(N)</i>	<i>kc</i>	<i>kc</i>
				<i>(N/mm2)</i>	<i>(N/mm2)</i>
				<i>S=a·p</i>	<i>S=a·p</i>
50	0,1	705	837	3525	4185
100	0,1	690	634	3450	3170
50	0,05	288	334	2880	3340
100	0,05	412	362	4120	3620
Nota: profundidad=2 mm					



Capítulo III. Modelo de elementos finitos

Se puede observar que se obtienen valores de fuerza específica de corte de entre 2880 y 4185 N/mm² con lo que comparándolo los datos obtenidos con los recogidos en las referencias bibliográficas, donde se tiene en el primer caso valores de 3600 N/mm² y para el segundo caso de entre 4500 y 5500N/mm², se puede concluir la coherencia de los resultados siendo estos bastante aceptables y por tanto se confirma la validez del modelo.



Capítulo IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Se han realizado modelos correspondientes a la simulación de 2 pasadas de corte en las siguientes condiciones:

1. $V_c = 50$ / $avance = 0,1$
2. $V_c = 50$ / $avance = 0,05$
3. $V_c = 100$ / $avance = 0,1$
4. $V_c = 100$ / $avance = 0,05$

Unidades de la V_c (Velocidad de corte) en m/min y de avance en mm

Entre la 1ª y la 2ª pasada de corte, se produce el enfriamiento correspondiente a una revolución de la pieza comentado en el punto de enfriamiento tras primera pasada del capítulo anterior.

Posteriormente, con el objeto de determinar las tensiones residuales después de la 1ª y 2ª pasada, fue necesario enfriar la pieza en todos esos casos hasta temperatura ambiente, tal cual se describe en el Capítulo 3 en la etapa de procesamiento.

En el análisis de los resultados se han calculado los valores medios de las componentes, así como el intervalo en el que se mueven dichos valores. En todos ellos se ha verificado que estabilizaban y que no había valores con grandes variaciones.

4.2 EFECTO TERMOMECAÁNICO DE LA 1ª PASADA

- **Temperatura del material en la 2ª pasada debido a la 1ª pasada.**

De cara al análisis de temperaturas que se efectúa en este apartado, cabe señalar, la región de interés de cara al proceso de mecanizado, donde se tiene la zona de cizalladura, zona contacto viruta herramienta y zona mecanizada de la pieza. Haciendo hincapié en la temperatura de partida en la 2ª pasada (con el pequeño enfriamiento utilizado descrito en la definición del modelo), se trata de una temperatura baja (cercana a la temperatura ambiente) en la pieza como se puede ver en las siguientes figuras.

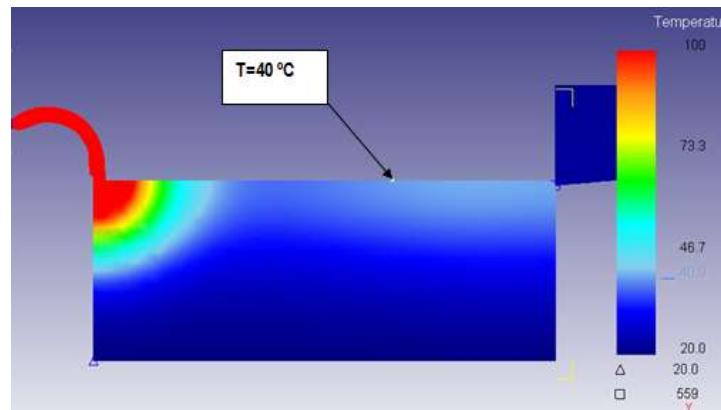


Figura 45: imagen genérica de la temperatura del material antes de la 2ª pasada

Cabe señalar que estas temperaturas indicadas en la superficie de la pieza, aumentarían en un proceso real donde se realizan varias pasadas.

En las siguientes figuras se muestra la temperatura de la pieza al comenzar la segunda pasada para cada uno de los cuatro casos analizados. Como se puede observar, se trata de temperaturas muy similares. El caso en el que se ha calentado más es para $V_c=50$ m/min y $a=0.1$ mm/rev, lo que podría explicar que las tensiones residuales generadas según el eje x tras la primera pasada sean algo menores, debido al ablandamiento térmico.

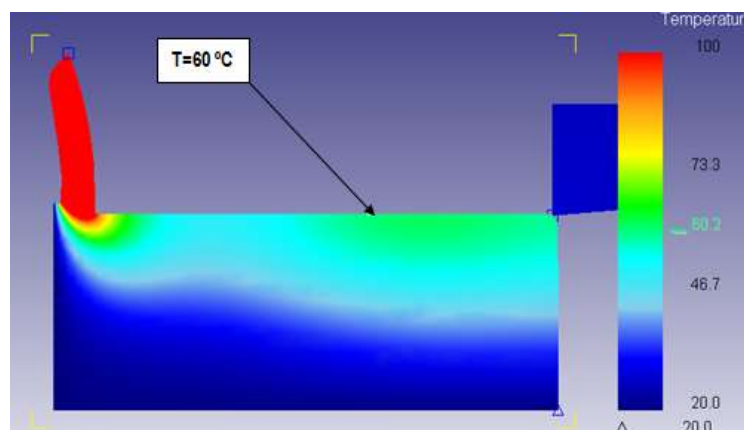


Figura 46: $V_c=50$ m/min; $a=0,1$ mm/rev

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

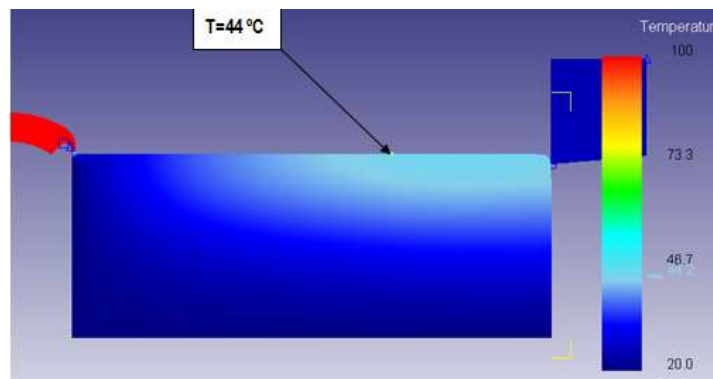


Figura 47: $V_c=100\text{ m/min}$; $a=0,1\text{ mm/rev}$

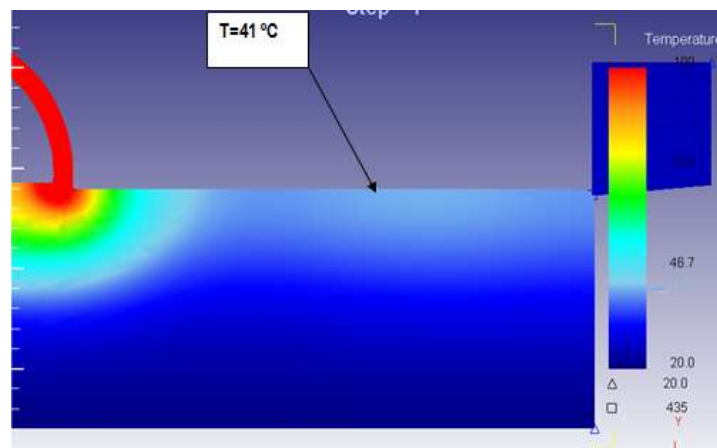


Figura 48: $V_c=50\text{ m/min}$ $a=0,05\text{ mm/rev}$

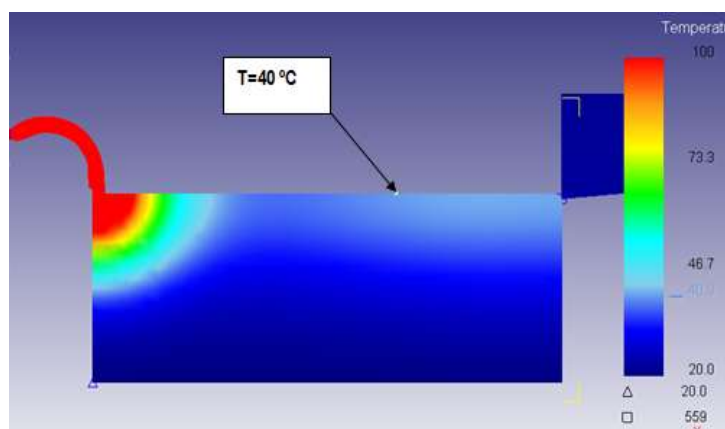


Figura 49: $V_c=100\text{ m/min}$ $a=0,05\text{ mm/rev}$



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Tensiones residuales en el eje x antes de realizar la 2ª pasada**

En las siguientes figuras, se observa el estado de las tensiones residuales sobre la superficie justo antes de la 2ª pasada. Hay que señalar que no es el mismo caso que en el que se han medido las tensiones residuales tras la primera pasada enfriando hasta temperatura ambiente la pieza, caso que se analiza más adelante. Se observa en la Tabla 7 como queda tensionada la pieza y como influye el aumento de la velocidad de corte en el incremento de ese estado tensional. Asimismo sirve como base para entender el posterior comportamiento de las tensiones residuales tras la primera pasada con el enfriamiento a temperatura ambiente mostrado en la Tabla 8

Tabla 7: efecto de la Vc en el estado tensional de la pieza antes de la 2ª pasada

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA
<i>Vc (m/min)</i>	<i>a (mm/rev)</i>	<i>Tensión residual en eje x (MPa) antes de la 2ª pasada</i>	
50 ↘	0,1	197	↑ 47%
100 ↓		291	
50 ↘	0,05	152	↑ 242%
100 ↓		520	

Tabla 8: tensiones residuales eje x en tras la primera pasada (con enfriamiento a temperatura ambiente) en función de la velocidad de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA
<i>Vc (m/min)</i>	<i>a (mm/rev)</i>	<i>Tensión residual en eje x (MPa) 1ª pasada</i>	
50 ↘	0,1	336	↑ 48%
100 ↓		500	
50 ↘	0,05	350	↑ 79%
100 ↓		625	

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS



En cuanto a cómo afecta el avance a las tensiones residuales sólo se puede llegar a concluir que para altas velocidades, disminuir el avance a la mitad, la pieza queda más tensionada para esta simulación.

Tabla 9: efecto del avance en el estado tensional de la pieza antes de la 2ª pasada

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	<i>Tensión residual en eje x (MPa) antes de la 2ª pasada</i>	
0,1 ↘	50	197	↓ 22%
0,05 ↓		152	
0,1 ↘	100	291	↑ 78%
0,05 ↓		520	

Tabla 10: tensiones residuales eje x en tras la primera pasada (con enfriamiento a temperatura ambiente) en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	<i>Tensión residual en eje x (MPa)</i>	
0,1	50	336	↑ 4%
0,05		350	
0,1	100	500	↑ 25%
0,05		625	

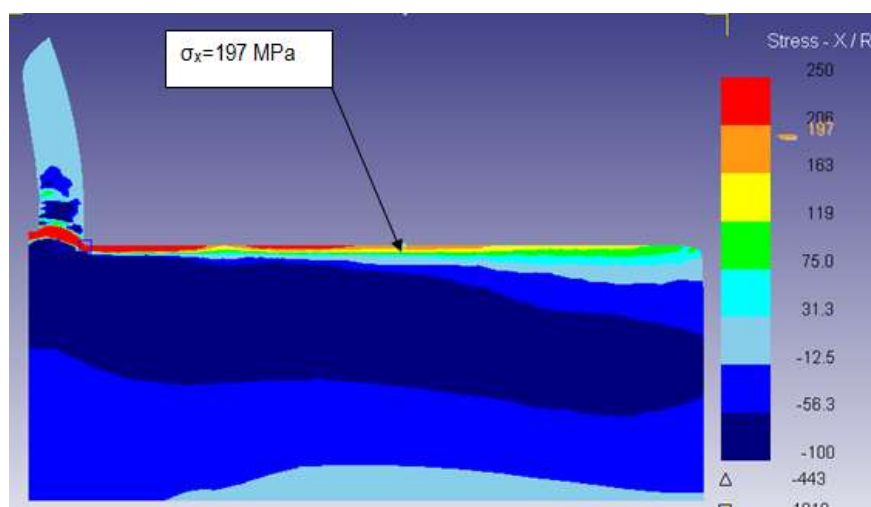


Figura 50: $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm/rev

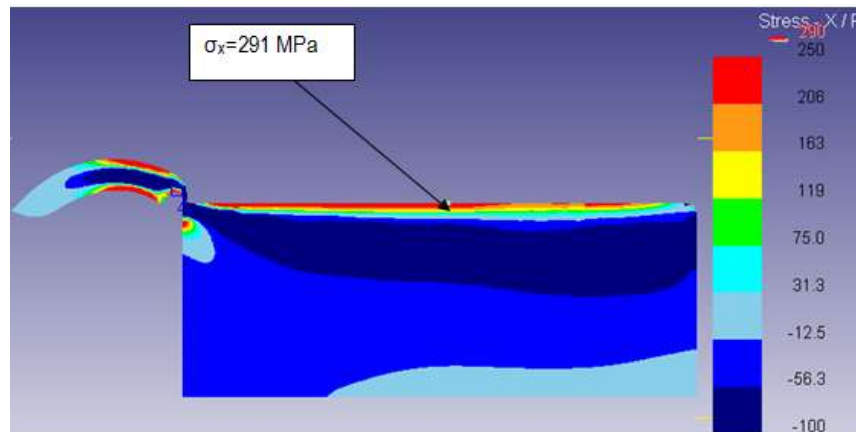


Figura 51: Vc=100 m/min y a=0,1 mm/rev

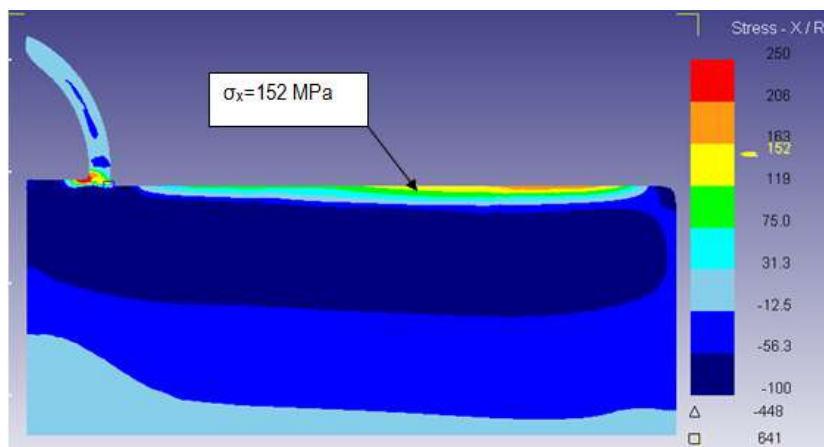


Figura 52: Vc=50 m/min y a=0,05 mm/rev

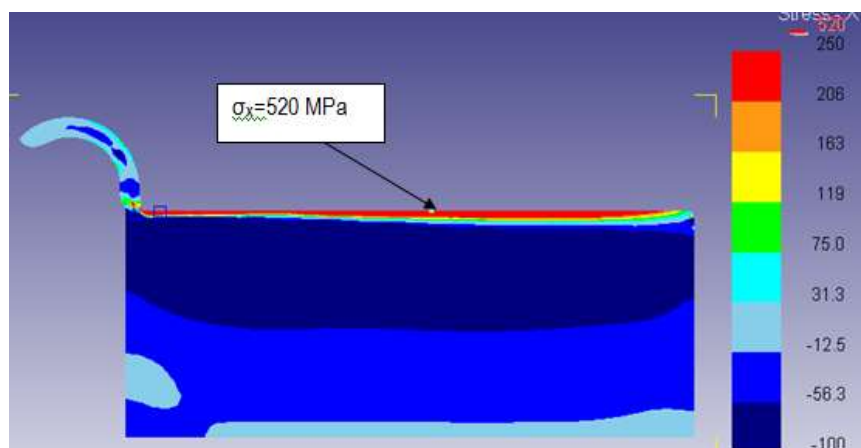


Figura 53: Vc=100 m/min y a=0,05 mm/rev



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3 ESPESOR DE VIRUTA Y ÁNGULO DE CIZALLADURA

Los factores que influyen en la formación de viruta son el ángulo de desprendimiento, la fricción en la zona de contacto viruta-herramienta, el endurecimiento del material por deformación (Childs et al, 2000), así como la geometría de la arista de la herramienta y el fluido de corte. Estos factores están relacionados con la geometría de corte, y particularmente con la geometría de la viruta definida por el espesor de viruta, el ángulo de cizalladura y la longitud de contacto con la herramienta.

En este proceso de análisis, la geometría de la herramienta va a ser constante, con un radio de punta de 0,02mm. Así mismo el ángulo de desprendimiento va a ser de 0° y el de incidencia de 5° como se comentó anteriormente a la hora de definir la geometría de la herramienta.

La morfología de la viruta está muy relacionada con el efecto de las sobre las condiciones de fricción y térmicas, ya que cuanto mayor sea el espesor de la viruta, mayor es el calor almacenado que se ha generado en la zona de cizalladura (zona primaria) y de contacto viruta-herramienta (zona secundaria). También tiene otros muchos efectos tales como la distribución de presión sobre la superficie de desprendimiento.

También cabe destacar que cuanto mayor es el radio de curvatura de la viruta, mayor es el área de contacto y por lo tanto se disipa más energía en esa zona de contacto entre la viruta y la herramienta.

Algunos autores también estiman el radio de curvatura de la viruta, aunque en general no existe ninguna generalización o relación que se pueda realizar entre el radio de curvatura de la viruta y otros parámetros de mecanizado. La curvatura de la viruta es muy sensible a interferencias exteriores, en otras palabras, la viruta puede chocar con el portaherramientas o con la misma pieza durante el mecanizado. El diseño del rompevirutas también tiene un efecto determinante en la curvatura de la viruta, así como en la segmentación de la misma.

Se obtiene viruta continua en todos los casos analizados y el espesor de la viruta se considera no variable. En algún momento de la simulación parece que comienza a aparecer lo que podría ser un diente de sierra, propio de la viruta segmentada, pero posteriormente estabiliza.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Observando minuciosamente la simulación se concluye que es debido a alguna pequeña alteración puntual en el mallado que queda corregida.

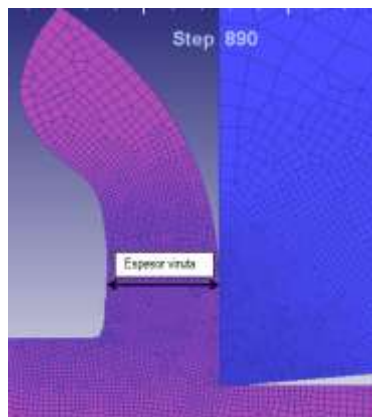


Ilustración 2: imagen de la medición del espesor de viruta

Analizando los resultados obtenidos tenemos que:

- **En función del número de pasada**

Atendiendo al número de pasada, se puede observar que el espesor de la viruta disminuye en la 2ª pasada. Esta disminución del espesor a su vez hace que el ángulo de cizalladura aumente. Se observa que esto no ocurre en el caso de $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm donde el espesor de viruta aumenta y el ángulo de cizalladura disminuye.

Se tiene una disminución en torno al 30% para avances de 0,05 mm/rev y en de un 16% para avances de 0,1 mm/rev con $V_c=100$. Para $V_c=50$ m/min y avance=0,1 mm se tiene un aumento de un 15% al pasar de la 1ª pasada a la 2ª, lo que llama la atención. Por ello se ha comprobado la simulación en detalle para detectar cualquier posible error y es el resultado que arroja dicho caso.

Una de las razones de que ocurra la disminución del espesor de viruta y el consiguiente aumento del ángulo de cizalladura, puede ser entre otras cosas debido a que el material está más duro en alguno de los casos, por las tensiones residuales generadas en la primera pasada, aunque aquí ya habría que tener en cuenta otros factores, como las temperaturas alcanzadas en las distintas simulaciones analizadas que pudieran “ablandar” el material, lo que se conoce como ablandamiento térmico.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 11: espesor viruta en función del número de pasada

COND. DE CORTE			R. NUMÉRICO	TENDENCIA
Nº pasada	Vc (m/min)	a (mm/rev)	Espesor de viruta (mm)	%
1ª pasada	50	0,1	0,33	↑ 15%
2ª pasada			0,38	
1ª pasada	50	0,05	0,17	↓ 29%
2ª pasada			0,12	
1ª pasada	100	0,1	0,3	↓ 16%
2ª pasada			0,25	
1ª pasada	100	0,05	0,17	↓ 30%
2ª pasada			0,12	

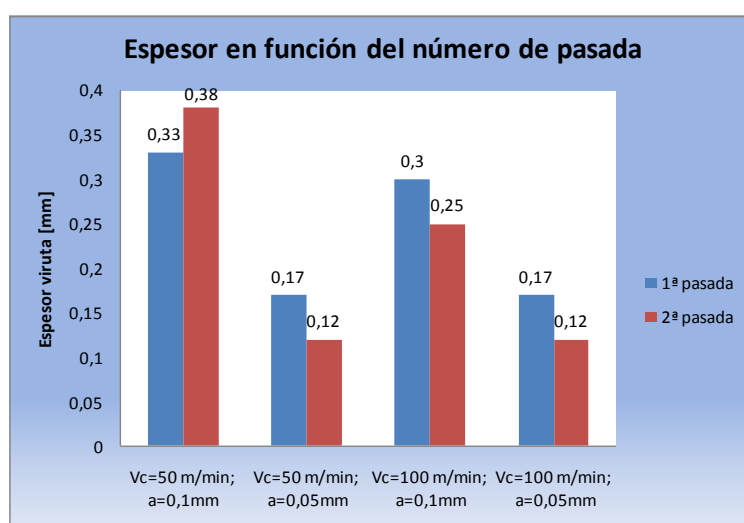


Figura 54: espesor de viruta en función del número de pasada

- En función del avance

Lógicamente el espesor de viruta está directamente relacionado con el avance por lo que al reducir un 50% el avance, se obtiene una variación similar del espesor de viruta (ver Tabla 12). Para velocidad de corte de 50 m/min, al variar el avance de 0,1 a 0,05 mm/rev, se tiene que el espesor de la viruta disminuye un 48% y un 68% para 1ª y 2ª pasada.

Para velocidad de corte de 100 m/min, al realizar este mismo cambio en el avance de 0,1 a 0,05 mm/rev, la disminución es de un 43% y un 52% para 1ª y 2ª pasada.

También cabe señalar que para estos casos con avance 0,05mm, al disminuir el espesor, aumenta el ángulo de cizalladura un 20% y un 30% para 50 y 100 m/min respectivamente, con un valor para dicho ángulo en torno a los 20°.



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la segunda pasada se puede comentar de la geometría de la viruta, que se curva mucho antes. De media unos 800 pasos antes. Esto se explicará más en detalle al hablar de la longitud de contacto.

En la primera pasada, para avances de 0,1mm el valor medio del espesor de viruta se sitúa en torno a 0,3mm, mientras que para avances de 0,05 el valor es de 0,15mm. Con lo que tendríamos que el al mismo tiempo que se reduce el avance a la mitad, también se reduce el espesor de la viruta en la misma proporción.

En la segunda pasada estos valores se sitúan en torno a 0,12 mm de espesor de viruta para avance de 0,05 mm/rev. Cabe señalar que en el caso de avance 0,1 mm/rev no existe esa semejanza en los resultados obtenidos, teniendo 0,36 mm para 50 m/min y 0,28 mm para 100 m/min.

Tabla 12: espesor de viruta en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	espesor 1ª pasada (mm)		espesor 2ª pasada (mm)	
0,1 ↘	50	0,33	↓ 48%	0,38	↓ 68%
0,05 ↘		0,17		0,12	
0,1 ↘	100	0,3	↓ 43%	0,25	↓ 52%
0,05 ↘		0,17		0,12	

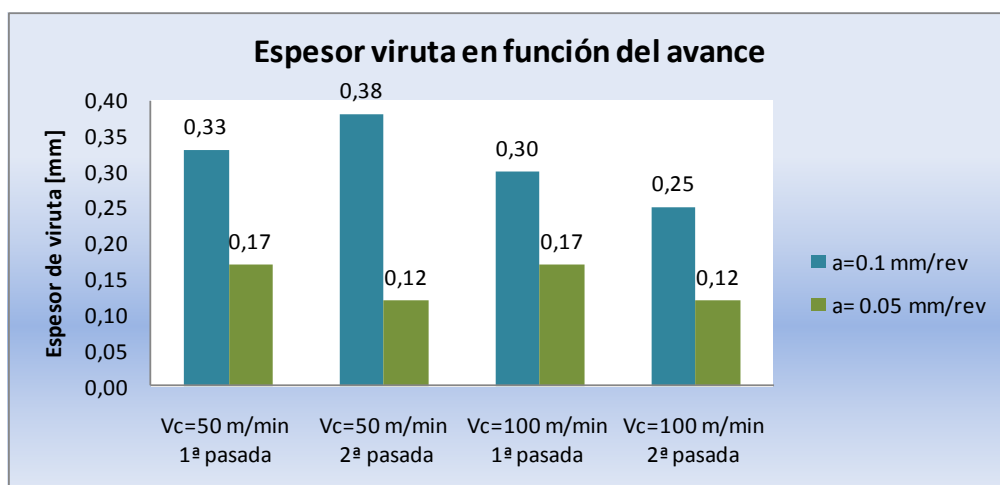


Figura 55: espesor de viruta en función del avance



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- En función de la velocidad de corte

Al variar la velocidad de corte, se tiene que para avance igual a 0,1 mm/rev existe una tendencia a disminuir el espesor de la viruta en la 1ª y la 2ª pasada, mientras que para avance de 0,05 mm/rev, no se aprecia una variación en el espesor de la viruta.

Comentar que al aumentar la velocidad de corte se generan pequeñas variaciones en el espesor de la viruta, formando un tipo de viruta similar a la denominada viruta segmentada, ver Tabla 14. Para poder observar que este efecto es fiable, es necesario mantener un mallado denso de 5 micras en las zonas de interés, ya que si no se pierde información y se generan distorsiones en la malla y hay que comprobar si esas variaciones en el espesor de la viruta son reales o son debidas a esas pequeñas distorsiones introducidas.

Tabla 13: espesor de viruta en función de la velocidad de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	espesor 1ª pasada (mm)		espesor 2ª pasada (mm)	
50 ↘	0,1	0,33	↓ 9%	0,38	↓ 40%
100 ↓		0,3		0,23	
50 ↘	0,05	0,17	↓ 0%	0,12	↓ 0%
100 ↓		0,17		0,12	

A continuación se muestran en la Tabla 14 los valores de espesor de viruta y ángulo de cizalladura ϕ correspondientes a los modelos numéricos realizados en las simulaciones. En el caso de la obtención del ángulo de cizalladura, en todos los casos se midió geométricamente, de forma trigonométrica. Donde tenemos un triángulo rectángulo, en el que cateto opuesto al ángulo corresponde aproximadamente al avance de la herramienta y la hipotenusa de dicho triángulo corresponde con el plano (zona) de cizalladura del material.

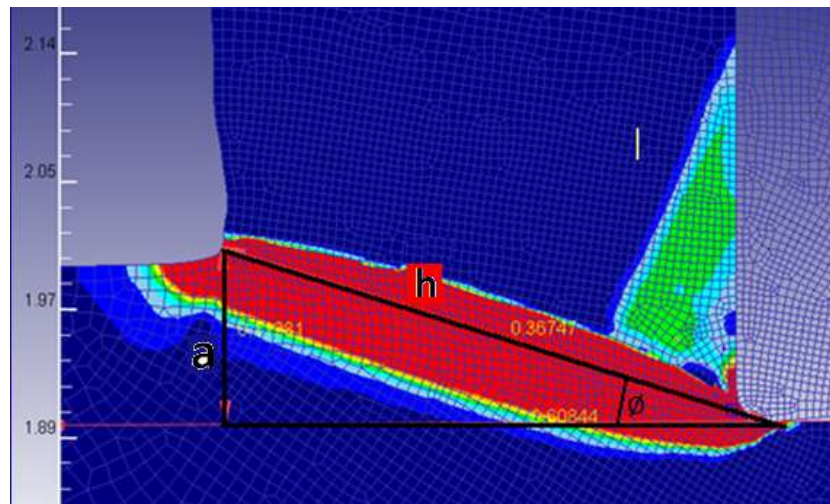


Figura 56: visualización del ángulo de cizalladura

$$\phi = \arcsen \frac{a}{h}$$

También existe una relación geométrica (López de Lacalle et al, 2000).

$$\phi = \arctg \left(\frac{r \cdot \cos \gamma}{(1 - r \cdot \sin \gamma)} \right)$$

Donde ϕ es el ángulo de cizalladura, γ es el ángulo de desprendimiento y r es la relación de corte definida por t/t_c ; siendo t es el espesor de viruta no deformada, igual al avance en los casos estudiados.

No ha sido necesario recurrir a esta relación ya que la aproximación utilizada de

$\phi = \arcsen \frac{a}{h}$ es muy similar, aportando unos buenos resultados.

Tabla 14: datos relativos a espesor de viruta y ángulo de cizalladura

ESPESOR DE LA VIRUTA & ÁNGULO DE CIZALLADURA			
Primera pasada			
CASO 1 → Vc=50 m/min; a=0,1 mm/rev	CASO 2 → Vc=100m/min; a=0,1 mm/rev	CASO 3 → Vc=50 m/min; a=0,05 mm/rev	CASO 4 → Vc=100 m/min; a=0,05 mm/rev
Espesor = 0,33 mm	Espesor = 0,30 mm	Espesor = 0,17 mm	Espesor = 0,17 mm
Tipo espesor viruta → constante	Tipo constante	Tipo constante	Tipo constante
Ángulo de cizalladura $\phi = 17.8^\circ$	$\phi = 17.3^\circ$	$\phi = 16.7^\circ$	$\phi = 16.4^\circ$
Segunda pasada			
CASO 5 → 2ª pasada caso 1	CASO 6 → 2ª pasada caso 2	CASO 7 → 2ª pasada caso 3	CASO 8 → 2ª pasada caso 4
Espesor = 0,41 mm	0,23 mm	0,12 mm	0,12 mm
Tipo espesor viruta → constante	Tipo constante/ curva antes	Tipo constante	Tipo constante
Ángulo de cizalladura $\phi = 14.8^\circ$	$\phi = 21.3^\circ$	$\phi = 19.9^\circ$	$\phi = 21.6^\circ$
VALORACIONES			
$\phi \downarrow 16.85\%$	$\phi \uparrow 23.1\%$	$\phi \uparrow 19.2\%$	$\uparrow \phi \quad 31.7\%$
Apenas se curva. Igual que 1ª pasada.	Se curva antes que en la 1ª pasada	Se curva unos 800 pasos antes que en la 1ª pasada	Se curva unos 700 pasos antes que en la 1ª pasada

4.4 LONGITUD DE CONTACTO VIRUTA HERRAMIENTA

La longitud de contacto que se da en la zona secundaria entre la viruta y la herramienta tiene un papel importante sobre la temperatura y el desgaste de la misma, a pesar de que el calor generado en dicha zona representa un porcentaje pequeño respecto al calor total generado, es un parámetro de interés, ya que en esta zona se alcanzan presiones y temperaturas elevadas.

Esta longitud de contacto viruta-herramienta se ha determinado midiendo desde la superficie mecanizada al punto de pérdida de contacto entre la viruta y la herramienta, como se muestra en la Figura 57 y Figura 58.

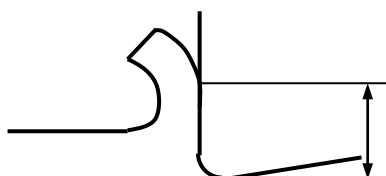


Figura 57: longitud de contacto viruta herramienta

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

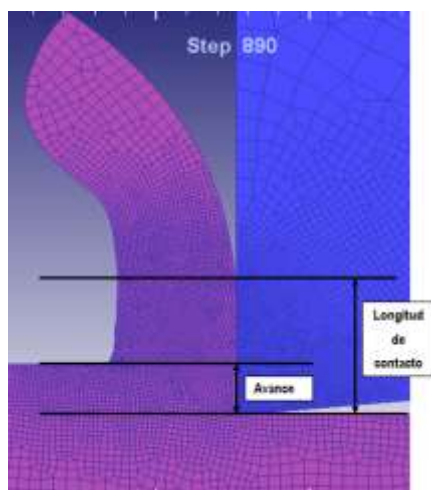


Figura 58: visualización de avance y longitud de contacto

- Número de pasada**

Se puede comprobar que de la primera pasada a la segunda disminuye la longitud de contacto a igualdad de condiciones en tres de los cuatro casos planteados. Esta disminución es debida a que, como se vio anteriormente, el espesor de la viruta es menor en la 2ª pasada y el ángulo de cizallamiento es mayor en dicha pasada, ofreciendo así menos resistencia a curvarse. Los porcentajes existentes son de un 36% de incremento para el primer caso, y 8%, 25% y 20% de disminución de la longitud de contacto para los siguientes. Ver Tabla 15.

Tabla 15: longitud de contacto en función de la pasada

<i>Nº pasada</i>	<i>V_c</i> (m/min)	<i>a</i> (mm/rev)	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
			<i>L_c</i> (mm)	
1ª pasada	50	0,1	0,3	↑ 36%
2ª pasada			0,41	
1ª pasada	50	0,05	0,25	↓ 8%
2ª pasada			0,23	
1ª pasada	100	0,1	0,16	↓ 25%
2ª pasada			0,12	
1ª pasada	100	0,05	0,15	↓ 20%
2ª pasada			0,12	

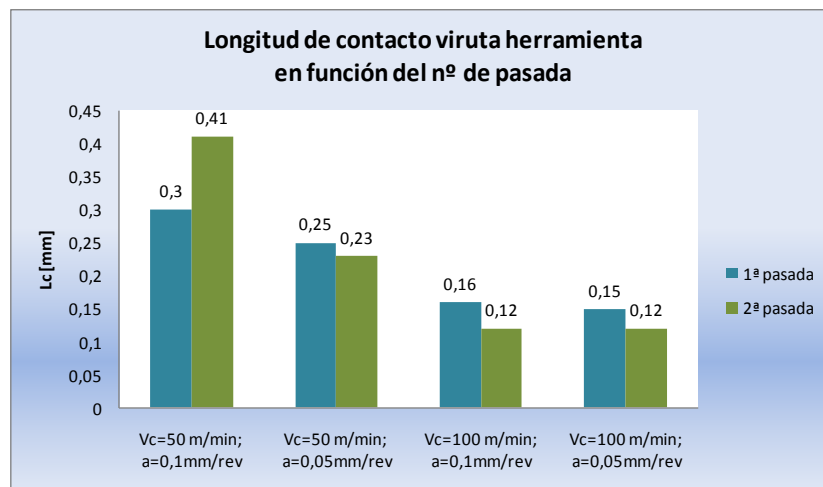


Figura 59: longitud de contacto viruta herramienta en función del número de pasada

A continuación se muestran imágenes relativas al caso singular que aparece al pasar de la 1ª pasada a la 2ª, para $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm/rev donde se aprecia ese incremento en el espesor de la viruta para este caso, con un aumento del 36%.

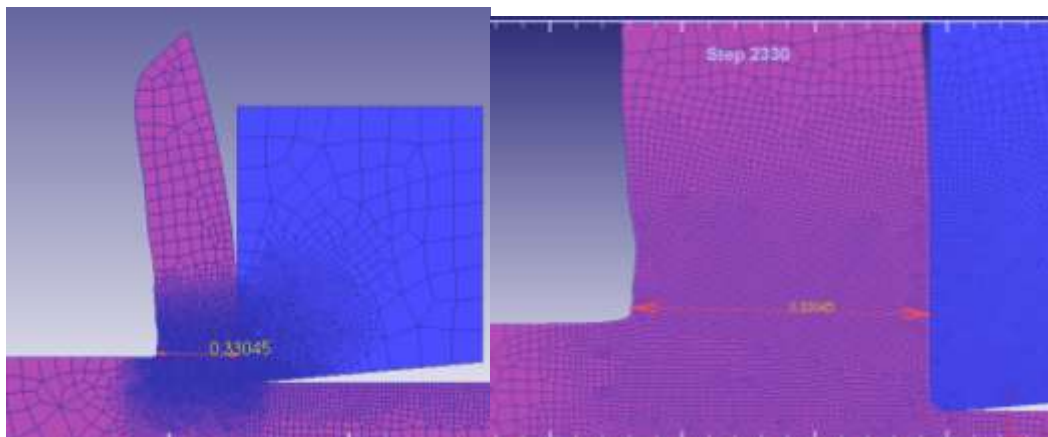


Figura 60: imágenes relativas al espesor de la viruta en la 1ª pasada para $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm/rev

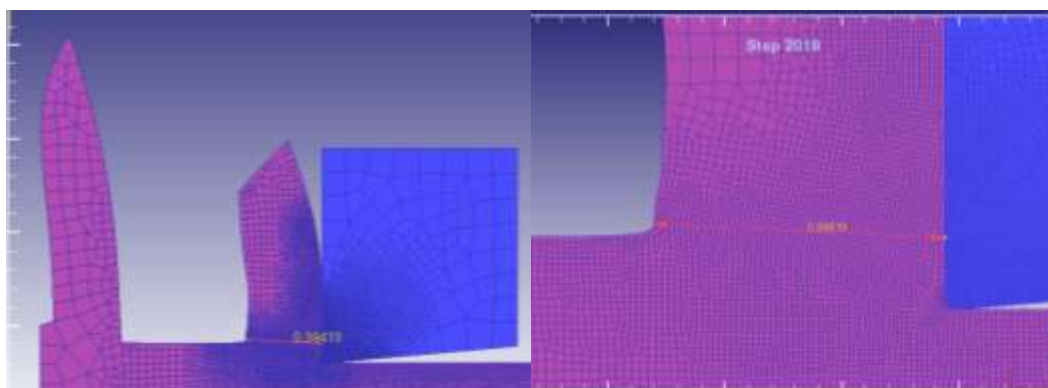


Figura 61: imágenes relativas al espesor de la viruta en la 2ª pasada para $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm/rev

- Avance

También se puede observar al variar el parámetro de avance disminuyéndolo, como también disminuye la longitud de contacto, con porcentajes en torno a un 50% (ver Tabla 16). Esto es bastante entendible ya que desde el primer cuanto menos avance exista, menor va a ser la longitud de contacto al principio del proceso. Esto se puede observar en la Figura 58

Tabla 16: longitud de contacto en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	L_c 1ª pasada (mm)		L_c 2ª pasada (mm)	
0,1	50	0,3	↓ 47%	0,41	↓ 70%
0,05		0,16		0,12	
0,1	100	0,25	↓ 40%	0,23	↓ 47%
0,05		0,15		0,12	

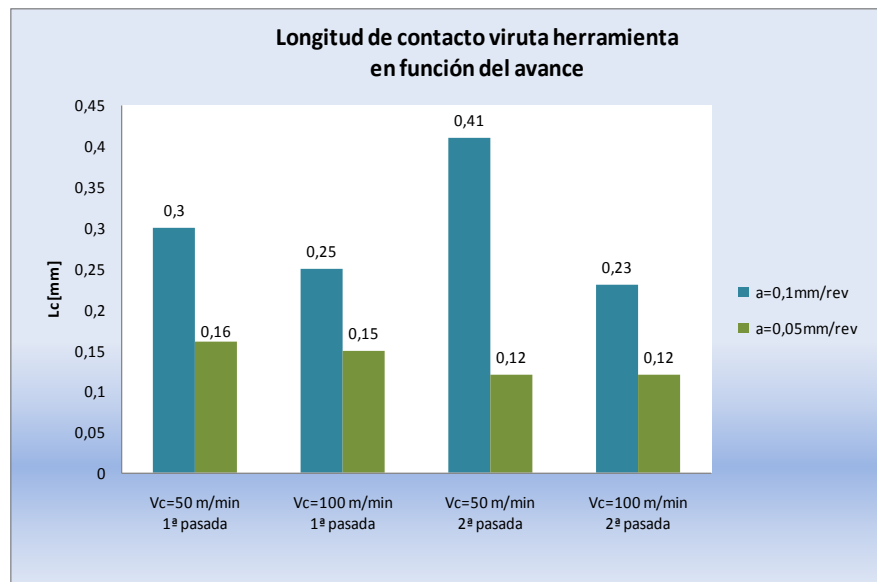


Figura 62: longitud de contacto viruta herramienta en función del avance

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Velocidad de corte**

Igualmente, al variar la velocidad de corte, también se mantiene la tendencia en la disminución del valor de la longitud de contacto. En este caso existen variaciones desde un 6% a un 44%. Ver Tabla 17.

Tabla 17: longitud de contacto en función de la velocidad de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	L_c 1ª pasada (mm)		L_c 2ª pasada (mm)	
50	0,1	0,3	↓ 16%	0,41	↓ 44%
100		0,25		0,23	
50	0,05	0,16	↓ 6%	0,12	0%
100		0,15		0,12	

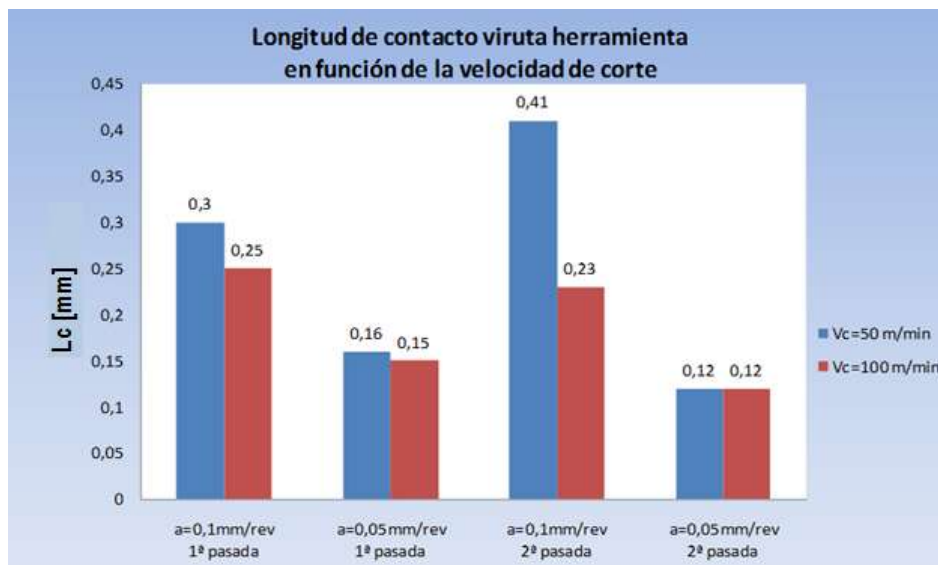


Figura 63: longitud de contacto viruta herramienta en función de la velocidad de corte

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.5 FUERZA DE CORTE

Como en el resto de los análisis, se estudia desde el punto de vista de dos casos. Variación en función del número de pasada, y variación en función de los parámetros de corte analizados, que son V_c (velocidad de corte en m/min) y a (velocidad de avance mm/rev). Las fuerzas de corte no presentan demasiadas oscilaciones y estabilizan rápidamente, detallando los valores entre los que oscila y pudiendo obtener un valor medio como puede observar en la Figura 64.

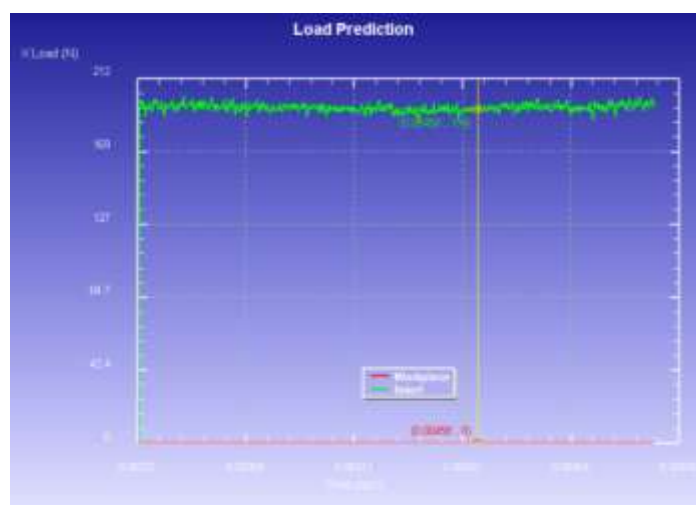


Figura 64: gráfica de evolución de la fuerza de corte durante el proceso

Tabla 18: tabla resumen de las fuerzas de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	R. NUMÉRICO
V_c (m/min)	a (mm/rev)	F_c (1ª pasada) (N)	F_c (2ª pasada) (N)
50	0,1	705	837
100	0,1	690	634
50	0,05	288	334
100	0,05	412	362

A simple vista se pueden observar algunos datos con tendencias esperables, como es una mayor fuerza de corte cuando se incrementa el avance.

Como se puede apreciar en la

Tabla 18, la fuerza de corte se incrementa notablemente con el avance, mientras que se ve menos afectada en la mayor parte de los casos analizados por la velocidad de corte.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Atendiendo al análisis en función de los distintos parámetros, tenemos:

- **Número de pasada**

Variación de la fuerza de corte en función del número de pasada varía de forma que para cualquiera de los dos avances, tanto en 1ª como en 2ª pasada, en los casos de $V_c=50$ m/min aumenta en torno a un 19% y en los casos de $V_c=100$ m/min disminuye en torno a un 10%. La tendencia comentada para el caso en el que se trabaja con velocidades de corte mayores puede ser debido a que cuando trabajamos a altas velocidades, el calentamiento del material en la zona primaria es mayor, ya que se disminuye el tiempo para disipar el calor con lo que el material se “ablanda” debido a la mayor temperatura y ofrece menos resistencia al corte.

Tabla 19: función del número de pasada

COND. DE CORTE			R. NUMÉRICO	TENDENCIA
<i>Nº pasada</i>	<i>V_c</i> (m/min)	<i>a</i> (mm/rev)	<i>F_c</i> (N)	%
1ª pasada	50	0,1	705	↑ 19%
2ª pasada			837	
1ª pasada	50	0,05	288	↑ 16%
2ª pasada			334	
1ª pasada	100	0,1	690	↓ 8%
2ª pasada			634	
1ª pasada	100	0,05	412	↓ 12%
2ª pasada			362	

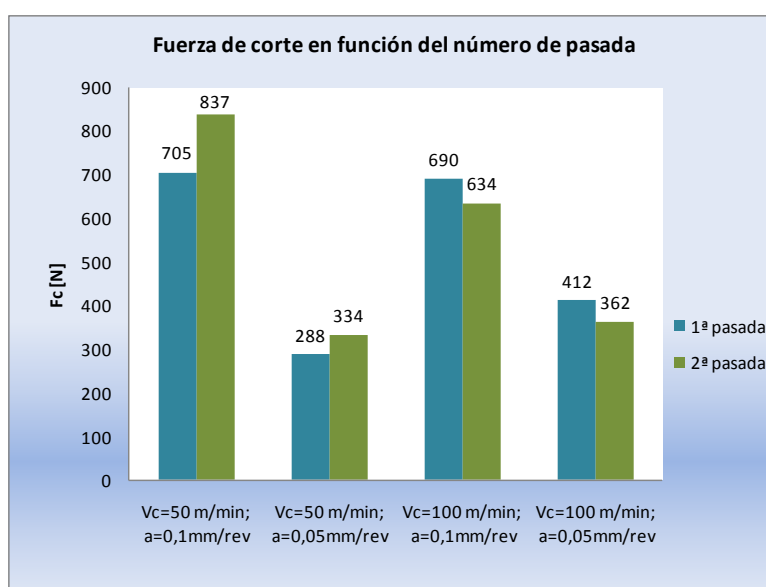


Figura 65: F_c (fuerza de corte) en función del número de pasada

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Avance

En cuanto comparar el avance se tiene que cuanto mayor es este, mayor es la fuerza de corte, como cabría de esperar, ya que existe más material frente a la herramienta ofreciendo resistencia al haber avanzado más hacia el interior de la pieza, como se vio en la Figura 58 para el caso de la longitud de contacto.

Se obtiene que la F_c disminuye en un 60% para el caso de pasar de avance 0,1 a 0,05 mm/rev con $V_c = 50$ m/min y una disminución del 40% con $V_c = 100$ m/min.

Tabla 20: caso de variación del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	F_c (1ª pasada) (N)		F_c (2ª pasada) (N)	
0,1 ↘	50	705	↓ 59%	837	↓ 60%
0,05 ↓		288		334	
0,1 ↘	100	690	↓ 40%	634	↓ 43%
0,05 ↓		412		362	

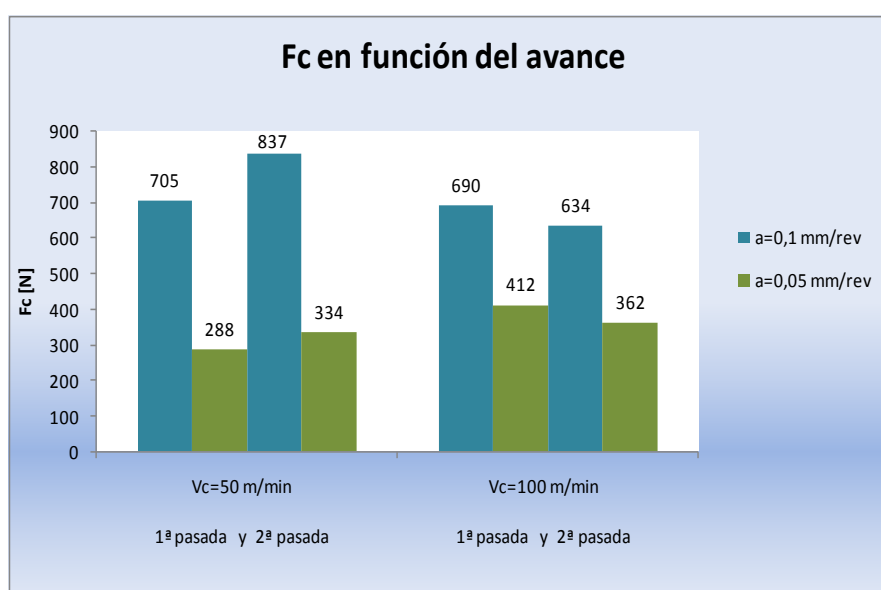


Figura 66: fuerza de corte en función del avance

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Velocidad de corte**

Centrándonos en la variación de la velocidad de corte de 50 a 100 m/min dentro de una misma pasada, con avances de 0,1mm/rev, tenemos que para la primera pasada, la fuerza de corte disminuye un 2%. Para la segunda pasada, en esta misma medición la fuerza de corte, sigue la misma tendencia con una disminución en un 24%

Por el contrario, se ve que para avances de 0,05mm/rev, al realizar este mismo estudio, la fuerza de corte aumenta un 43% para la primera pasada y 8% para la segunda pasada.

Tabla 21: análisis caso de variación de velocidad de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	F_c (1ª pasada) (N)		F_c (2ª pasada) (N)	
50 ↘	0,1	705	↓ 2%	837	↓ 24%
100 ↘		690		634	
50 ↘	0,05	288	↑ 43%	334	↑ 8%
100 ↘		412		362	

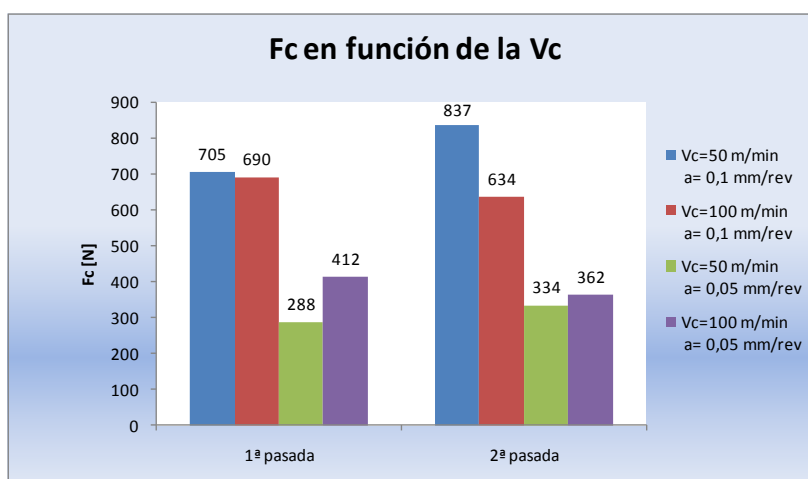


Figura 67: fuerza de corte en función de la velocidad de corte

Concluyendo así que el mayor peso dentro de las combinaciones estudiadas lo tiene el avance de cara a la Fuerza de corte, con variaciones de hasta un 60%. Variaciones de un 20% jugando con el parámetro de V_c y variaciones también de hasta un 20% en función de si damos una o dos pasadas.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.6 FUERZA DE AVANCE

En el caso de la fuerza de avance, se aprecian mayores oscilaciones, pero igualmente estabiliza y se puede obtener un intervalo en el que se mueve la fuerza y su media, de forma que no exista mucha dispersión en los datos como se puede ver en la Figura 68

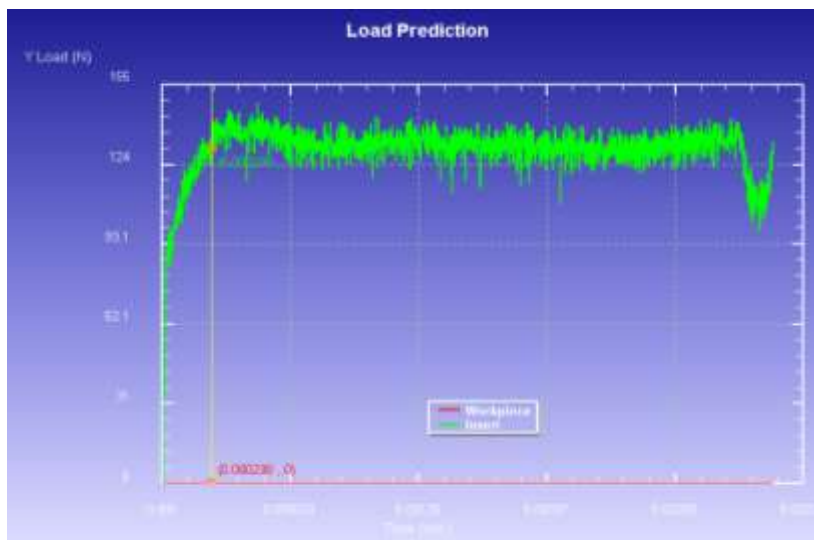


Figura 68: evolución de la Fuerza de avance correspondiente al caso 2 ($V_c=100$ m/min; $a=0,1$ mm)

Tabla 22: tabla resumen de las fuerzas de avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	R. NUMÉRICO
V_c (m/min)	a (mm/rev)	F_a (1ª pasada) (N)	F_a (2ª pasada) (N)
50	0,1	274	480
100	0,1	260	335
50	0,05	180	348
100	0,05	246	228

A partir de aquí analizamos cómo afecta cada parámetro de interés en los resultados de la Fuerza de avance.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Número de pasada

Existe una singularidad para $V_c=100$ m/min y $a=0,1$ mm donde se tiene una disminución del 7% en la fuerza de avance al pasar de la 1ª a la 2ª pasada.

Debido a esta singularidad no se puede concluir una tendencia al igual que ocurría en algún caso anterior al analizar otro parámetro.

En el caso de $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm existe un aumento muy fuerte del 75% en la F_a (Fuerza de avance) al pasar de la 1ª a la 2ª pasada. Para esta misma velocidad y $a=0,05$ mm el aumento de la F_a es del 93%.

Para $V_c= 100$ m/min, se tiene un incremento del 30% para avances de 0,1 mm al comparar la 1ª pasada con la 2ª pasada.

La fuerza de avance está directamente relacionada con la longitud de contacto, ya que esta fuerza depende del deslizamiento y de la fricción que existe entre la viruta y la herramienta (Oraby y Hayhurst, 1991).

Tabla 23: análisis fuerza avance variando nº de pasada

COND. DE CORTE			R. NUMÉRICO	TENDENCIA
	V_c (m/min)	a (mm/rev)	F_a [N]	
1ª pasada	50	0,1	274	↑ 75%
2ª pasada			480	
1ª pasada	50	0,05	180	↑ 93%
2ª pasada			348	
1ª pasada	100	0,1	260	↑ 30%
2ª pasada			335	
1ª pasada	100	0,05	246	↓ 7%
2ª pasada			228	

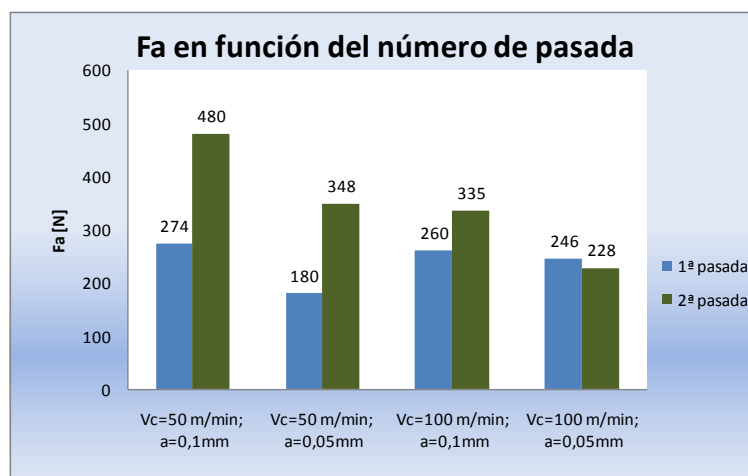


Figura 69: diagrama de barras para F_a en f(nº pasada)

- **Avance**

Continuando con el análisis de los resultados obtenidos se tiene que al disminuir el valor del avance de 0,1 mm/rev a la mitad, la fuerza de avance se reduce en torno a un 30% para tres de los cuatro casos.

Existe disminución menor para el caso de $V_c=100$ m/min en la primera pasada, donde dicho valor sólo disminuye en un 5%. Dicho caso ha sido revisado y se ha comprobado que la malla cumple con los requisitos de tamaño de 5 micrómetros en la zona de interés. Por todo ello, el resultado obtenido es tratado como un dato singular, que a pesar de no acercarse al mismo porcentaje, sí sigue la tendencia obtenida en el resto de casos.

Figura 70: F_a en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	F_a (1ª pasada) (N)		F_a (2ª pasada) (N)	
0,1	50	274	↓ 34%	480	↓ 27%
0,05		180		348	
0,1	100	260	↓ 5%	335	↓ 31%
0,05		246		228	

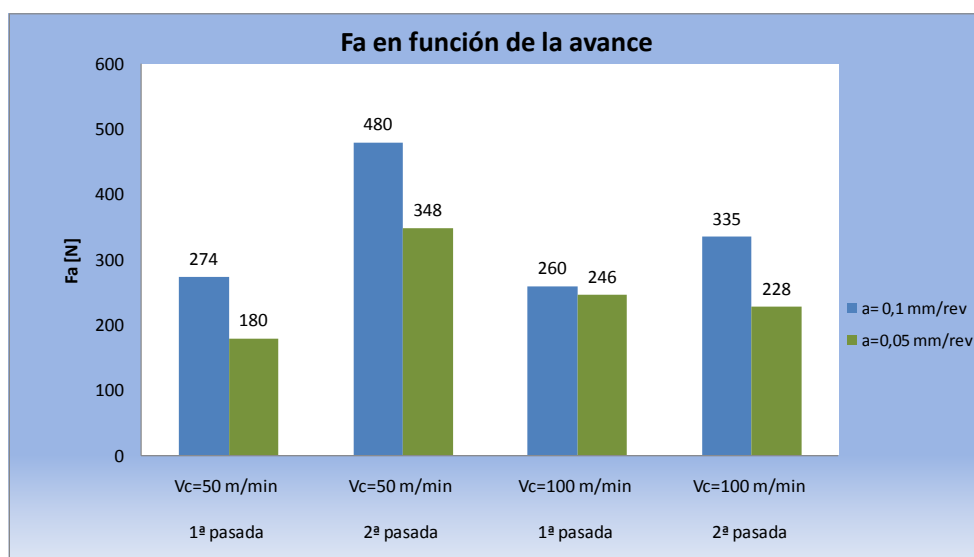


Figura 71: F_a en función del avance

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

• Velocidad de corte

Al realizar este análisis se tiene que en tres de los cuatro casos, al aumentar la velocidad de corte, hay una disminución en la fuerza de avance.

Para avance igual a 0,1 mm/rev, la disminución es de un 5% en la primera pasada, mientras que para la 2ª pasada ronda el 30%.

Para el avance de 0,05 mm/rev, en la 2ª pasada, se tiene con una disminución del 34%.

En el caso de avance igual a 0,05 mm/rev, aparece un caso singular dentro de los cuatro realizados, donde no se cumple lo reflejado anteriormente, con un incremento en la Fa de un 37% al variar la Vc en la 1ª pasada.

Tabla 24: análisis fuerza de avance variando Vc

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	F_a (1ª pasada) (N)		F_a (2ª pasada) (N)	
50	0,1	274	↓ 5%	480	↓ 30%
100		260		335	
50	0,05	180	↑ 37%	348	↓ 34%
100		246		228	

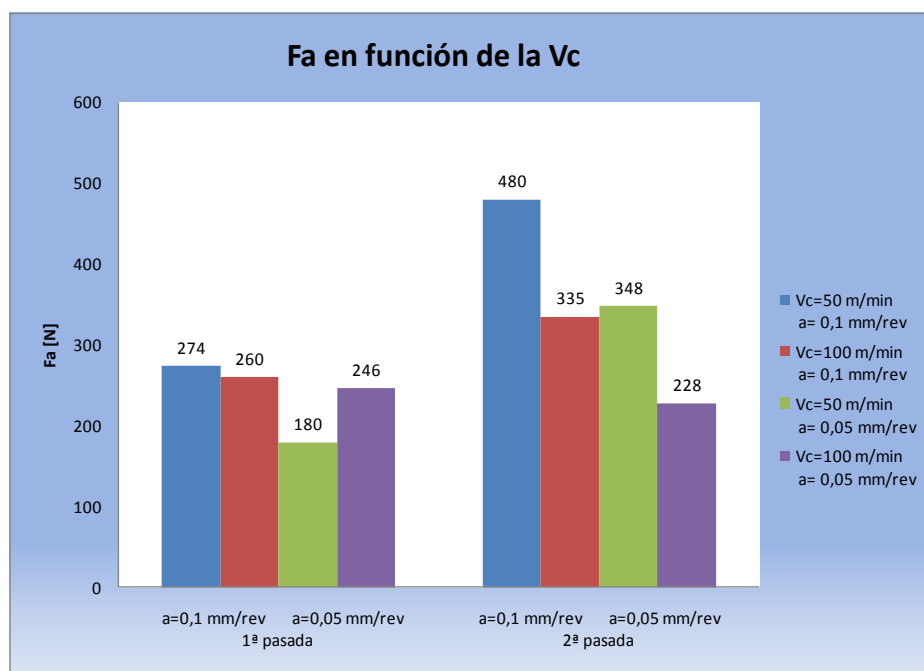


Figura 72: fuerza de avance variando la velocidad de corte



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.7 TEMPERATURAS

La temperatura es una magnitud fundamental en los procesos de mecanizado por su gran influencia en el desgaste de la herramienta y el daño producido en la superficie mecanizada. El conocimiento de la influencia de la geometría de la herramienta sobre la distribución de temperatura hace posible un mejor diseño de las herramientas, control de daño térmico del material, etc., por lo que es un campo de investigación de gran interés (Trent y Wright, 2000).

En este apartado se van a mostrar y analizar los valores de temperatura máxima obtenidos en la herramienta, en la superficie mecanizada y en la viruta.

Debe considerarse que las características del modelo numérico producen diferencias especialmente significativas entre las temperaturas en la herramienta obtenidas numéricamente y las temperaturas que realmente se producen durante los procesos de corte simulados. Estas diferencias se deben principalmente a que los tiempos de corte simulados son muy pequeños (de pocos milisegundos), a las dimensiones de la herramienta en el modelo ($1 \times 1 \text{ mm}^2$) y a las condiciones de contorno térmicas establecidas. Estos efectos se describirán en detalle a continuación.

El programa DEFORM permite determinar, mediante análisis térmico, el estado estacionario a partir de un determinado paso de una simulación de un proceso de corte. Esta herramienta mejoraría los resultados de temperatura en la herramienta obtenidos a partir del modelo. Sin embargo, en las versiones disponibles del programa DEFORM, esta opción sólo puede aplicarse a simulaciones realizadas estableciendo comportamiento plástico del material. El modelo numérico desarrollado en esta Proyecto considera comportamiento elastoplástico por lo que no ha sido posible determinar el estado estacionario para las simulaciones realizadas.

Por todo lo comentado anteriormente sobre las características del modelo, se concluye que van a existir diferencias importantes entre la distribución de temperatura en la herramienta de los procesos de mecanizado simulados y los valores de ensayo real, ya que el proceso no estabiliza. Con lo que los valores de temperatura indicados en los siguientes apartados van a aportar una información cualitativa y aplicable a análisis comparativos.

Es importante señalar que para el resto de temperaturas analizadas sí estabiliza el proceso.

4.7.1. TEMPERATURA DEL MATERIAL ZONA VIRUTA-HERRAMIENTA

En este apartado se muestra la temperatura máxima del material en la zona de contacto viruta-herramienta (conocida zona secundaria).

Esta zona, junto con la zona primaria de cizallamiento, son las zonas donde se concentran las fuentes de generación de calor en el mecanizado, por lo que se puede esperar que existan gradientes importantes de temperatura en la zona de corte. Se ha estimado que durante una operación característica de mecanizado, el 90% de la energía se disipa en la viruta, mientras que el resto lo hace en la herramienta y en la pieza de trabajo. El patrón de temperaturas depende de varios factores relacionados con las propiedades del material y con las condiciones de corte, incluyendo el tipo de fluido de corte utilizado durante el mecanizado, que en este caso no se usa ninguno. [Kalpakjian, 5ª edición].

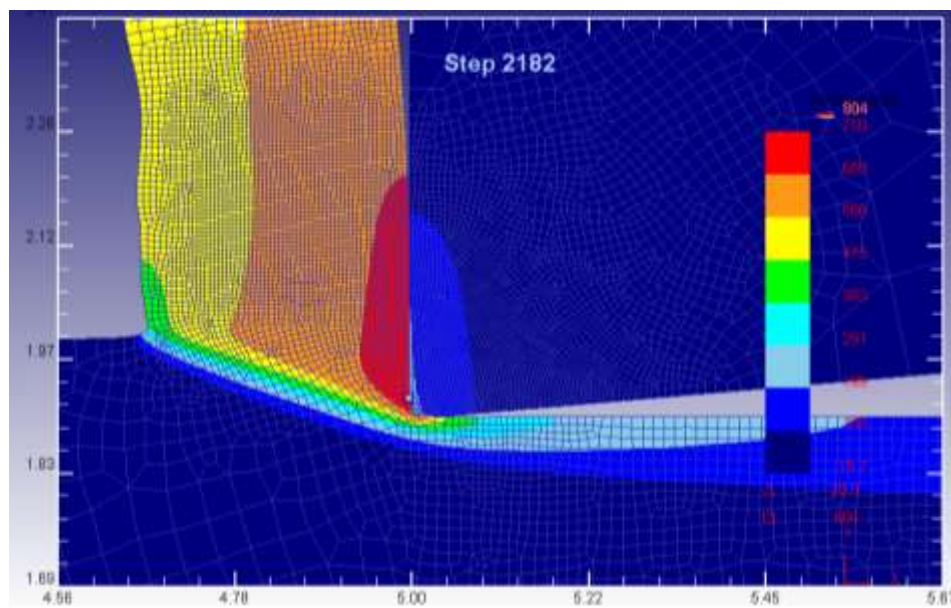


Figura 73: imagen en detalle de la zona de interés.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Procediendo al análisis de los resultados, se tiene que:

- **En función del N° de pasada:**

Se puede decir que existe una tendencia al pasar de 1 a 2 pasadas, relacionándolo a su vez con las velocidades de corte.

Para $V_c=50$ m/min la temperatura aumenta y para $V_c=100$ m/min disminuye.

En el caso de velocidades de corte de 50 m/min tenemos un aumento de la temperatura, de un 9% en el caso de avance igual a 0,1 mm/rev y de un 25% para avance igual a 0,05 mm/rev, mientras que para velocidades de 100 m/min, la temperatura disminuye en un 9% y un 3% para $a=0,1$ y 0,05 mm/rev.

Tabla 25: temperatura viruta-herramienta en función del n° pasada

COND. DE CORTE			R. NUMÉRICO	TENDENCIA
	V_c (m/min)	a (mm/rev)	$T_{m\acute{a}x. \text{ viruta-hta.}}$ (°C)	
1ª pasada	50	0,1	804	↑ 9%
2ª pasada			878	
1ª pasada	50	0,05	810	↑ 25%
2ª pasada			1010	
1ª pasada	100	0,1	694	↓ 9%
2ª pasada			630	
1ª pasada	100	0,05	900	↓ 3%
2ª pasada			870	

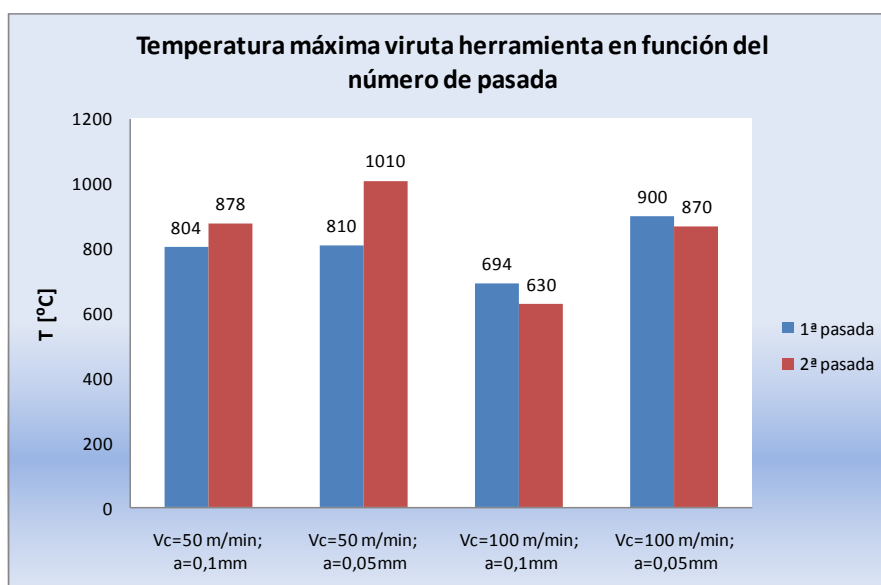


Figura 74: temperatura máxima viruta-herramienta en función del número de pasada

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

• Avance

En general se tiene que al disminuir el avance disminuye la temperatura en la zona de la viruta-herramienta para tres de los cuatro casos planteados.

Para $V_c=50$ m/min, si pasamos de avance 0,1 a 0,05 mm/rev tenemos disminuciones de la temperatura máxima en la zona viruta-herramienta de un 13 y un 28% respectivamente. Mientras que para esa misma variación de avance en la que nos movemos y trabajando con $V_c=100$ m/min en una 2ª pasada, la temperatura disminuye un 14%.

Aparece un caso singular en la 1ª pasada, con velocidad de 100 m/min, donde se produce un aumento en la temperatura de un 11%.

Tabla 26: temperatura en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	$T_{m\acute{a}x. \text{ viruta-hta.}}$ (1ª pasada) (°C)		$T_{m\acute{a}x. \text{ viruta-hta.}}$ (2ª pasada) (°C)	
0,1	50	804	↓ 13%	878	↓ 28%
0,05		694		630	
0,1	100	810	↑ 11%	1010	↓ 14%
0,05		900		870	

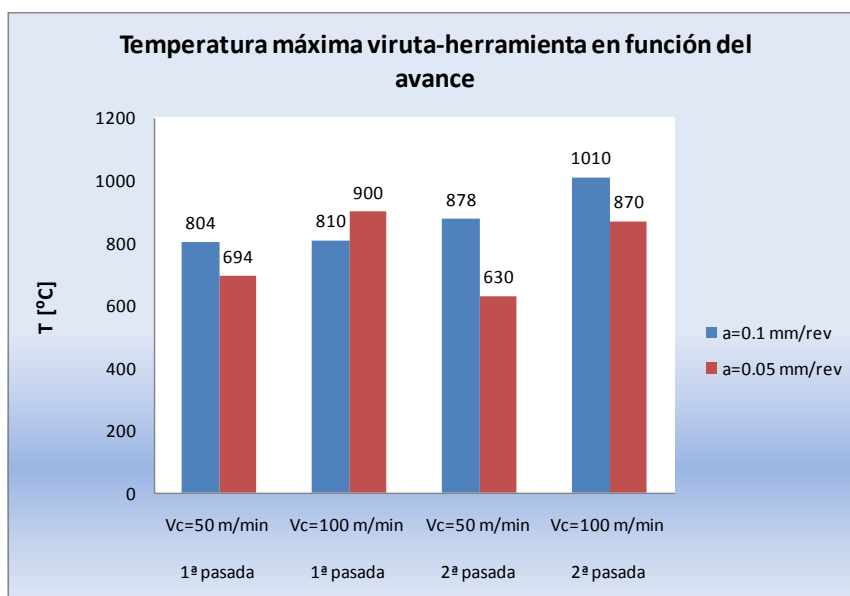


Figura 75: temperatura máxima viruta-herramienta en función del avance

- **Velocidad de corte**

Al aumentar la velocidad de corte, esto implica un aumento del calor generado y por tanto un aumento de la temperatura como se puede observar en los casos analizados. Viendo que existen unos aumentos de temperatura más considerables para avances de 0,05 mm/rev. Esto puede ser debido a que al tener menor avance y por consiguiente una viruta menos gruesa (como se vio en la Tabla 14), la viruta disipa menos calor y por lo tanto aumenta la temperatura en esta zona viruta-herramienta.

Tabla 27: tendencias de la temperatura viruta-hta. en función de la Vc

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	$T_{m\acute{a}x. \text{ viruta-hta.}}$ (1ª pasada) (°C)		$T_{m\acute{a}x. \text{ viruta-hta.}}$ (2ª pasada) (°C)	
50	0,1	804	↑ 8%	878	↑ 15%
100		810		1010	
50	0,05	694	↑ 30%	630	↑ 38%
100		900		870	

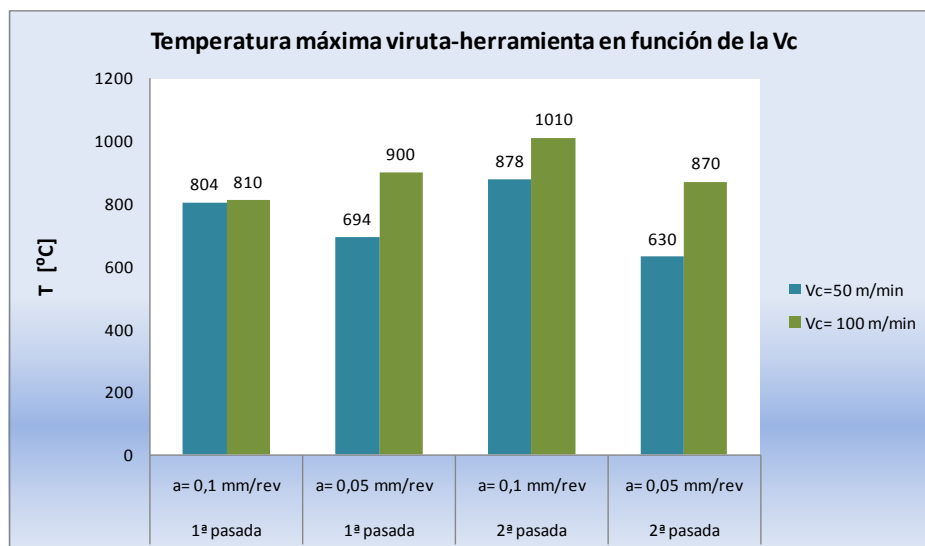


Figura 76: temperatura máxima viruta-herramienta en función de la velocidad de corte

4.7.2. TEMPERATURA DEL MATERIAL EN ZONA MECANIZADA

La temperatura máxima del material en la superficie mecanizada, se localiza en la zona terciaria, que se corresponde con la zona de contacto entre la superficie mecanizada y la superficie de incidencia de la herramienta. Dicha temperatura máxima se obtiene en la zona de contacto con el punto de tangencia del filo con la dirección del movimiento de corte.

La temperatura en la zona mecanizada no es tan alta como en la zona primaria y secundaria.

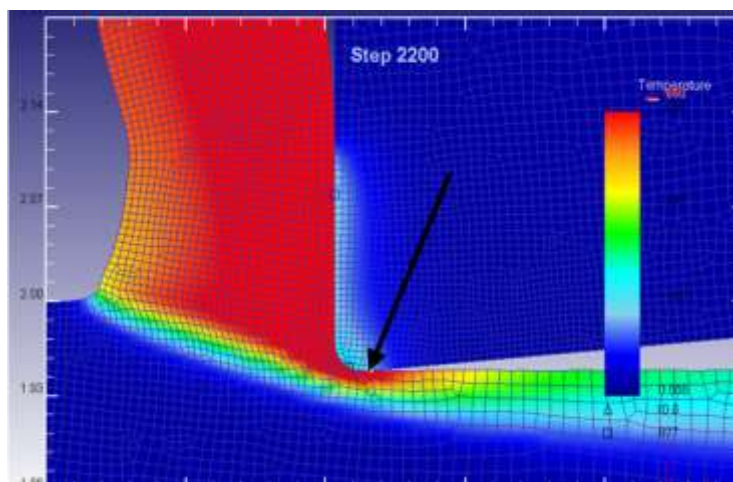


Figura 77: vista en detalle de la zona donde se toma la temperatura máxima en la zona mecanizada

Como en el resto parámetros analizados, se analiza cómo influye:

- **Nº de pasada**

Existen dos tendencias en la que influye la velocidad de corte con la que trabajemos.

Al realizar la 2ª pasada, para velocidad de corte de 50 m/min y avance de 0,1 y 0,05 mm/rev, se produce un incremento de la temperatura de la zona mecanizada en torno a un 20%.

Para la velocidad de corte de 100 m/min y ambos avances utilizados, se da una disminución de dicha temperatura en torno a un 18%.

Esto tiene su explicación probablemente en el espesor de la viruta, que como se comentó anteriormente, en la 2ª pasada disminuye unido a un menor tiempo de transferencia de calor viruta herramienta, da por consiguiente una disminución en la temperatura de la zona



Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

mecanizada. También se general menos calor en el corte porque el material que se mecaniza está más caliente debido a la 1ª pasada.

Tabla 28: temperatura máxima zona mecanizada en función del nº de pasada

Nº pasada	Vc (m/min)	a (mm/rev)	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
			Tmáx. zona mecanizada (°C)	
1ª pasada	50	0,1	543	↑ 17%
2ª pasada			633	
1ª pasada	50	0,05	600	↑ 20%
2ª pasada			718	
1ª pasada	100	0,1	600	↓ 16%
2ª pasada			503	
1ª pasada	100	0,05	660	↓ 18%
2ª pasada			541	

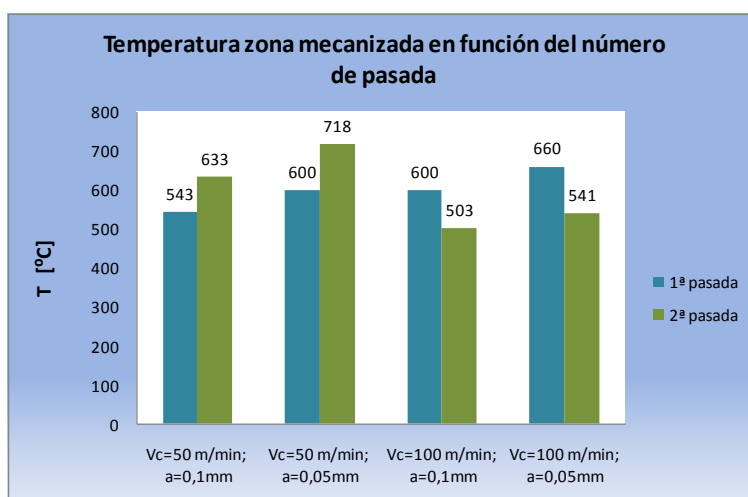


Figura 78: temperatura máxima zona mecanizada en función del número de pasada

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Avance**

Al observar la influencia del avance en la temperatura de la zona mecanizada, tenemos dos tendencias influidas por la pasada en la que nos encontremos.

Para la 1ª pasada, al variar el avance de 0,1 a 0,05 mm/rev, se tienen unos incrementos de la temperatura en torno al 10%, mientras que para la 2ª pasada, se tiene una disminución de la temperatura de entre un 20 y un 25%.

Tabla 29: temperatura zona mecanizada en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	$T_{m\acute{a}x. \text{ zona mecanizada}}$ 1ª pasada (°C)		$T_{m\acute{a}x. \text{ zona mecanizada}}$ 2ª pasada (°C)	
0,1	50	543	↑ 11%	633	↓ 20%
0,05		600		503	
0,1	100	600	↑ 10%	718	↓ 25%
0,05		660		541	

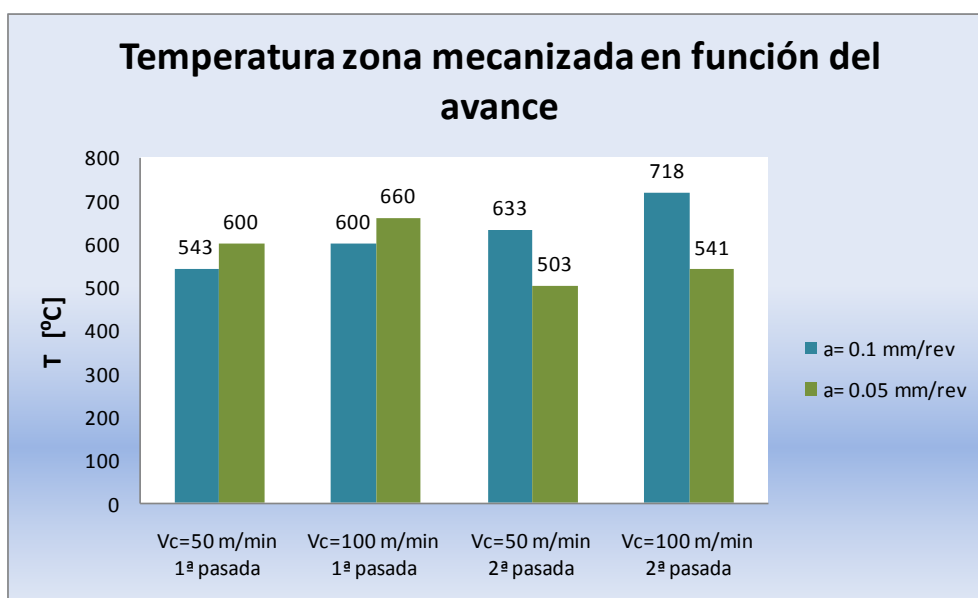


Figura 79: temperatura zona mecanizada en función del número de pasada

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Velocidad de corte**

En lo que se refiere a la variación de la velocidad de corte de cara a analizar la Temperatura máxima en la zona mecanizada, se tiene que existe una tendencia en los 4 casos planteados. Dicha tendencia muestra un aumento de la temperatura en la zona de análisis de en torno a un 10% aproximadamente para los 4 casos.

Tabla 30: temperatura máxima zona mecanizada en función de la Vc

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	$T_{m\acute{a}x. \text{ zona mecanizada}}$ 1^a pasada (°C)		$T_{m\acute{a}x. \text{ zona mecanizada}}$ 2^a pasada (°C)	
50	0,1	543	↑ 11%	633	↑ 13%
100		600		718	
50	0,05	600	↑ 10%	503	↑ 8%
100		660		541	

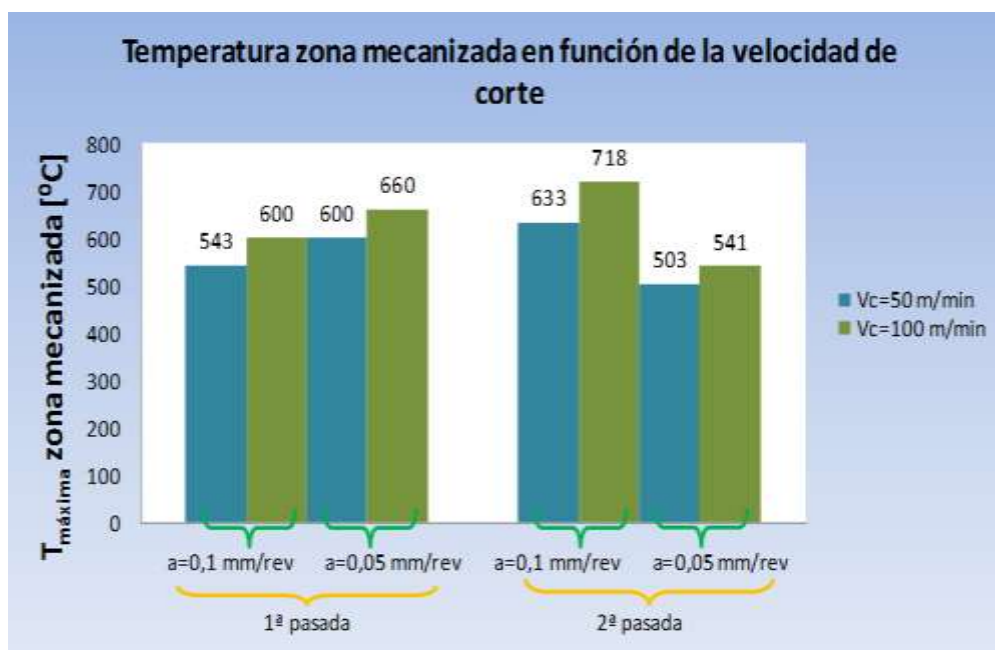


Figura 80: temperatura máxima zona mecanizada en función de la velocidad de corte

4.7.3. TEMPERATURA MÁXIMA EN LA HERRAMIENTA Y POSICIÓN

En este apartado se trata la temperatura máxima en la herramienta y posición en la que se alcanza dicha temperatura.

La temperatura máxima en la herramienta, no estabiliza como se puede observar en la Figura 81, ya que la duración del proceso es demasiado corta. Esto es debido a que en este estudio, apenas se recorren 3mm de longitud aproximadamente, sabiendo que tenemos una superficie a mecanizar de 5mm. Por lo que para obtener unos datos reales habría que aumentar el tiempo de duración del proceso. Contando con esto, se van a obtener una serie de datos orientativos de la temperatura de la herramienta y la evolución de la misma.

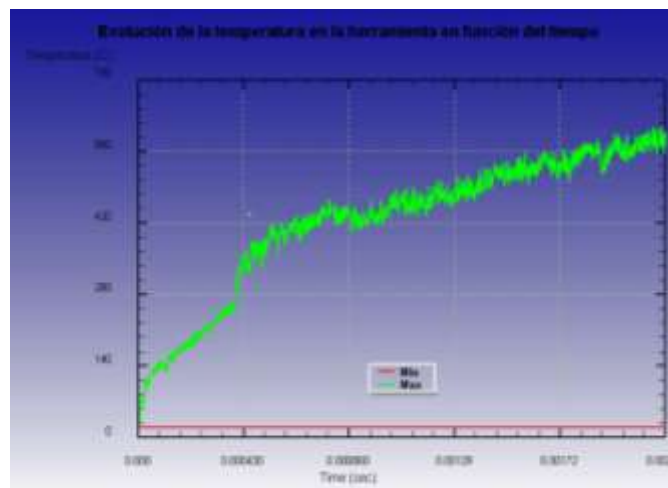


Figura 81: evolución de la temperatura de la herramienta en función del tiempo

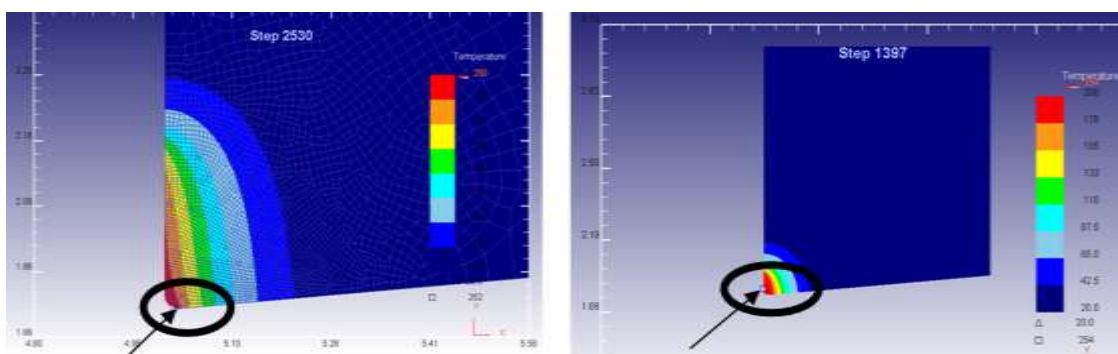


Figura 82: zonas de temperatura máxima en la herramienta

Las temperaturas máximas de la herramienta se encuentran en la zona de incidencia. Esto es debido a que se trabaja con material elastoplástico que produce una importante fricción

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

entre el material mecanizado y la zona de la herramienta correspondiente al flanco y superficie de incidencia. En el caso de $V_c=50$ m/min y $a=0,05$ mm/rev, para la 1ª y 2ª pasada, existen dos particularidades en lo que se refiere a la localización del punto de máxima temperatura en la herramienta, ya que dicho punto se encuentra más localizado en la zona de desprendimiento.

- **Nº pasada**

Se comprueba que para avances de 0,05 mm/rev la temperatura sube de manera muy significativa, un 144% para $V_c=50$ m/min y un 137% para $V_c=100$ m/min.

Para avances de 0,1 mm/rev, se tiene que para $V_c=50$ m/min sube un 24% y para $V_c=100$ m/min, se tiene una singularidad donde la temperatura en la herramienta disminuye un 2%, no teniendo apenas relevancia este valor en lo que se refiere al incremento de temperatura.

Con todo esto y echando un vistazo al diagrama de barras, se concluye que para al pasar de la 1ª a la 2ª pasada, se aprecia un aumento significativo de la temperatura en la herramienta cuando trabajamos con un avance menor.

Tabla 31: datos de $T_{m\acute{a}x.}$ En hta. en función de la pasada

<i>Nº pasada</i>	<i>V_c</i> (m/min)	<i>a</i> (mm/rev)	R. NUMÉRICO <i>T_{m\acute{a}x. hta.}</i> (°C)	TENDENCIA
1ª pasada ↘	50	0,1	250	↑ 24%
2ª pasada ↘			310	
1ª pasada ↘	50	0,05	280	↑ 144%
2ª pasada ↘			683	
1ª pasada ↘	100	0,1	260	↓ 2%
2ª pasada ↘			254	
1ª pasada ↘	100	0,05	310	↑ 137%
2ª pasada ↘			735	

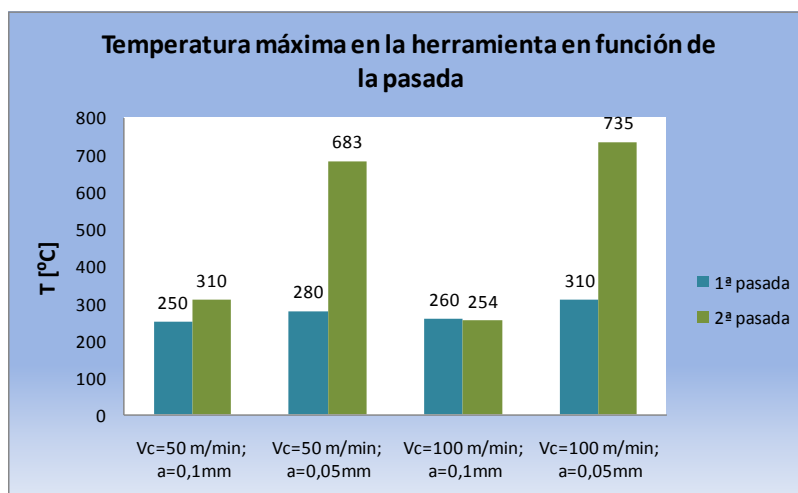


Figura 83: Temperatura máxima en la herramienta en función del número de pasada

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

• Avance

Al variar el parámetro del avance en el análisis de temperatura de la herramienta, se tiene que:

Existe una singularidad al variar en la 2ª pasada para velocidad de corte de 50 m/min donde se tiene una disminución del 18% en la temperatura.

Para los otros 3 casos analizados se produce un aumento de la temperatura en la herramienta, teniendo en la 1ª pasada, para $V_c=50$ m/min un incremento del 4%.

De igual manera, para $V_c=100$ m/min tenemos un incremento en la temperatura de la herramienta al variar el avance de un 11% en la 1ª pasada y de un 8% en la 2ª pasada

Con lo que concluimos de este análisis, que tiende a incrementarse la temperatura al disminuir el avance, salvo en el caso aislado comentado. Esto es debido a que al disminuir el avance, disminuye el espesor de la viruta, y por tanto, al tener una viruta con menor espesor, retira menor cantidad de calor generado.

Tabla 32: temperatura máxima en la herramienta en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO		TENDENCIA	R. NUMÉRICO		TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	$T_{máx. hta.}$ 1ª pasada (°C)			$T_{máx. hta.}$ 2ª pasada (°C)		
0,1	50	250	↑ 4%		310	↓ 18%	
0,05		260			254		
0,1	100	280	↑ 11%		683	↑ 8%	
0,05		310			735		

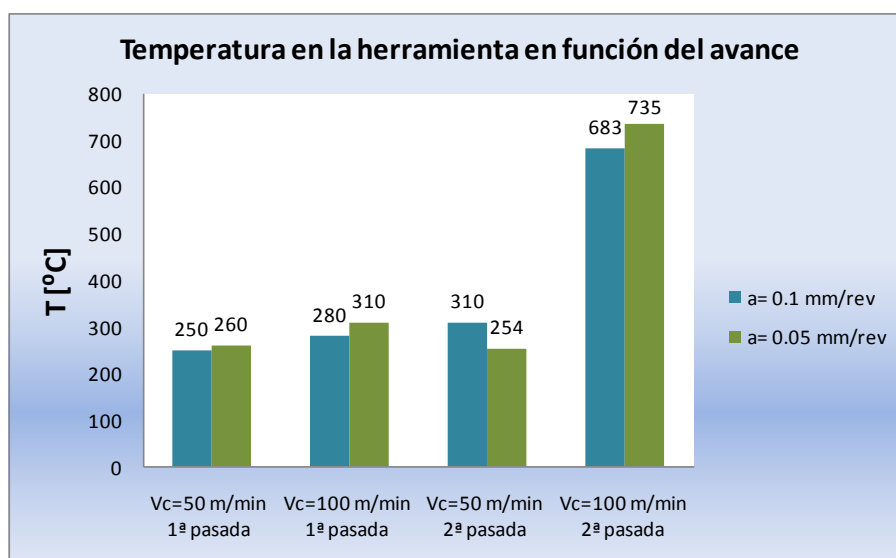


Figura 84: temperatura máxima en la herramienta en función del avance

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

• Velocidad de corte

Al variar la velocidad de corte en el proceso, se observa que en los cuatro casos analizados se produce un aumento de temperatura, mucho más significativo en la segunda pasada, como cabe de esperar, ya que la herramienta se encuentra más caliente tras la primera pasada.

Para la 1ª pasada, se tiene que al variar la V_c de 50 a 100 m/min, para un avance de 0,1 mm/rev, la temperatura se incrementa en un 12%; para un avance de 0,05 mm/rev, este incremento es de un 19%.

Para la 2ª pasada, se tiene que, al aumentar la velocidad de corte, para avances de 0,1 mm/rev, el incremento es de un 120% y cuando reducimos el avance a la mitad, el incremento de temperatura alcanza un 189%. Son saltos bastante significativos.

Tabla 33: temperatura máxima de la herramienta en función de la V_c

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	$T_{máx. hta.}$ 1ª pasada (°C)		$T_{máx. hta.}$ 2ª pasada (°C)	
50 ↘	0,1	250	↑ 12%	310	↑ 120%
100 ↓		280		683	
50 ↘	0,05	260	↑ 19%	254	↑ 189%
100 ↓		310		735	

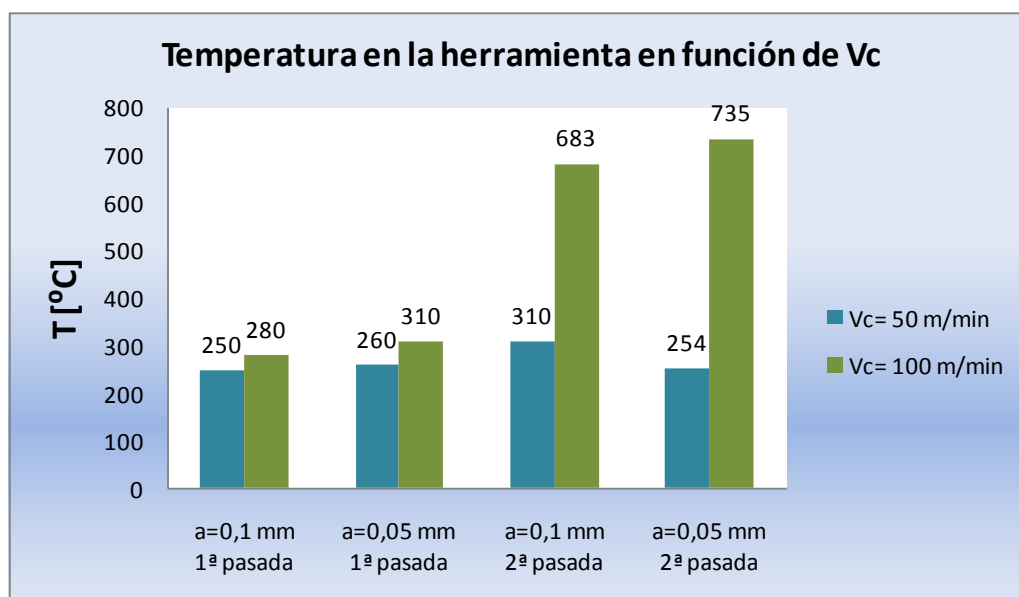


Figura 85: temperatura en la herramienta en función de la velocidad de corte



4.8 TENSIONES RESIDUALES

Las tensiones residuales se miden tras la pasada correspondiente una vez que se ha enfriado la pieza a temperatura ambiente. La medición se realiza en el eje X que es el eje en el que se desplaza la pieza.

En el estudio realizado, se observa que no existe un valor medio concreto para toda la superficie mecanizada, sino que se presentan una serie de fluctuaciones, con zonas de rebote en la parte más cercana a la viruta con unos valores altos que no sirven para comparar. Por otra parte, está la zona del extremo derecho de la pieza de donde tampoco se pueden extraer unos resultados comparativos ya que hay singularidades que no nos aportan datos fiables. Con lo que queda una región entre medias de las dos citadas anteriormente, que va a ser la zona de interés, de donde sí se puede extraer un valor medio, pero teniendo en cuenta, que los valores son crecientes y oscilan dentro de un rango pequeño, según avanzamos en la parte mecanizada en el sentido que se realizó la pasada.

Debido a todo lo explicado anteriormente, se concluye que los valores obtenidos no son representativos del mecanizado por no haber llegado a su estabilización en la longitud de corte simulada, pero sí sirven de aproximación para conocer el comportamiento del material a nivel cualitativo.

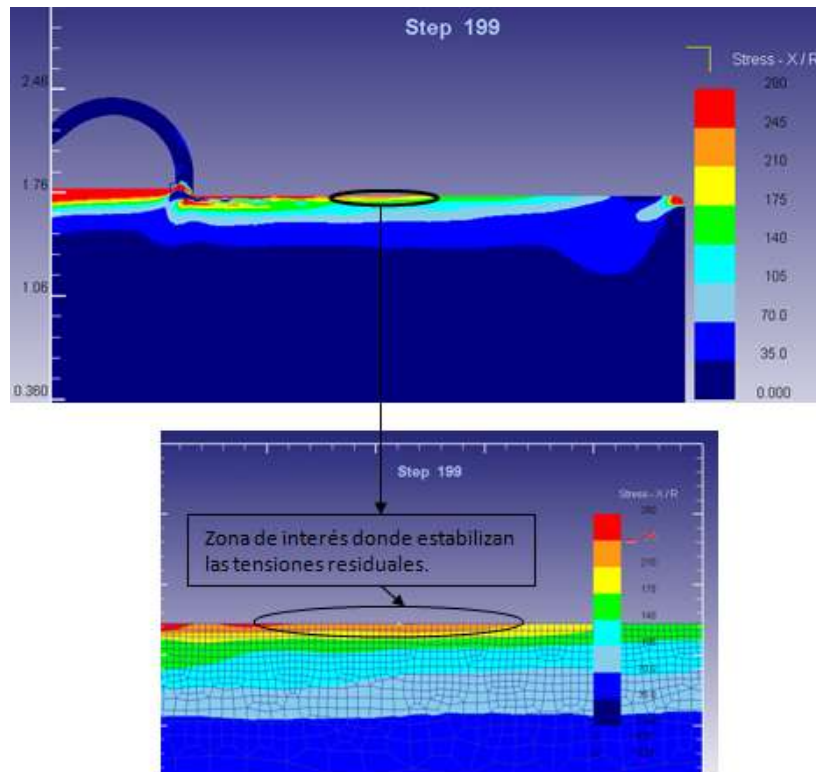


Figura 86: detalle de la zona de interés para medir tensiones residuales

A partir de aquí se procede al análisis en función de los distintos parámetros:

- **Número de pasada**

Existe una singularidad para el primer caso analizado, con $V_c=50$ m/min y $a=0,1$ mm/rev, donde esta tensión aumenta en un 117% al realizar la 2ª pasada.

Por lo general, se observa en tres de los cuatro casos, una disminución de la tensión residual en el eje x (que es el eje de la dirección de corte); para $V_c=50$ m/min se mueve en un valor del 13% y para $V_c=100$ m/min, se ronda el 65%.

Esta disminución, puede ser debida en algunos casos al aumento de temperatura del material, con lo que se modifican las propiedades elásticas del mismo. Como se puede comprobar en la Figura 87, al aumentar la temperatura disminuye la tensión de fluencia del material por lo general.

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

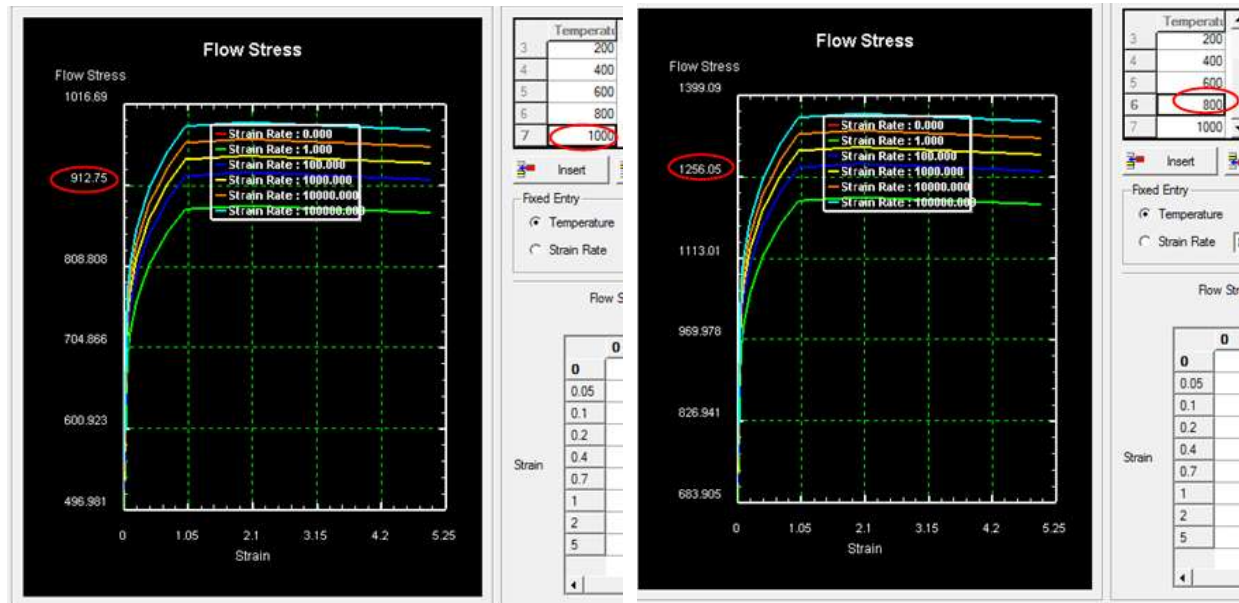


Figura 87: curvas de tensión de fluencia-deformación, para 1000°C y para 800°C. Se tiene que para 1000°C el valor de tensión de fluencia es de 912.75 Mpa y para 800°C este valor es de 1256.05 Mpa.

Tabla 34: tensiones residuales en eje x en función del número de pasada

Nº pasada	Vc (m/min)	a (mm/rev)	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
			Tensión residual en eje x (MPa)	
1ª pasada	50	0,1	336	↑ 117%
2ª pasada			730	
1ª pasada	50	0,05	500	↓ 13%
2ª pasada			437	
1ª pasada	100	0,1	350	↓ 64%
2ª pasada			125	
1ª pasada	100	0,05	625	↓ 68%
2ª pasada			200	

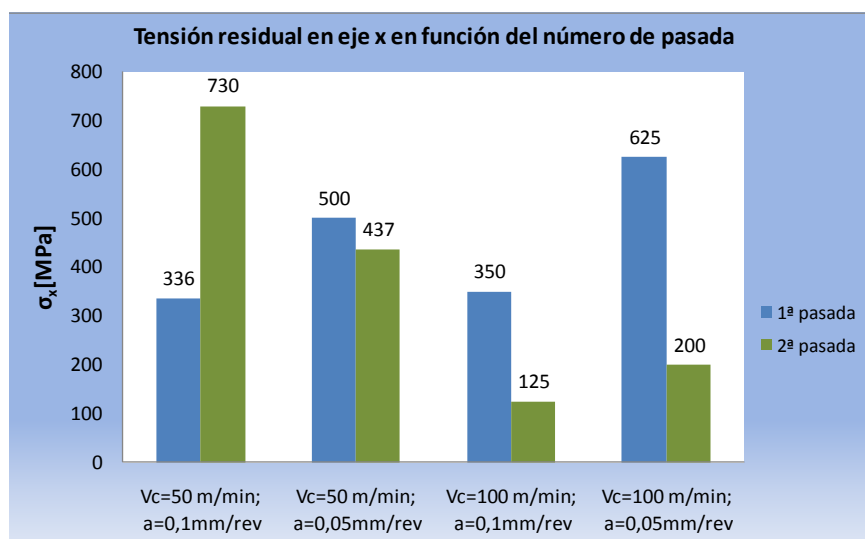


Figura 88: tensiones residuales en eje x en función del número de pasada

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Avance**

A raíz de los resultados obtenidos, comprobando la influencia del avance en la generación de tensiones residuales, se tiene que existen dos tendencias en función de si nos encontramos frente a la 1ª pasada o a la 2ª.

Para la 1ª pasada, al disminuir el avance, existe un incremento en las tensiones residuales, de un 4% para $V_c=50$ m/min y de un 25 % para $V_c=100$ m/min.

Para la 2ª pasada, lo que se da es una disminución de las tensiones residuales al disminuir dicho avance, teniendo, para $V_c=50$ m/min un 82% y para $V_c=100$ m/min un 54%.

Tabla 35: tensiones residuales en función del avance

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
a (mm/rev)	V_c (m/min)	Tensión residual en eje x (MPa)		Tensión residual en eje x (MPa)	
0,1	50	336	↑ 4%	730	↓ 82%
0,05		350		125	
0,1	100	500	↑ 25%	437	↓ 54%
0,05		625		200	

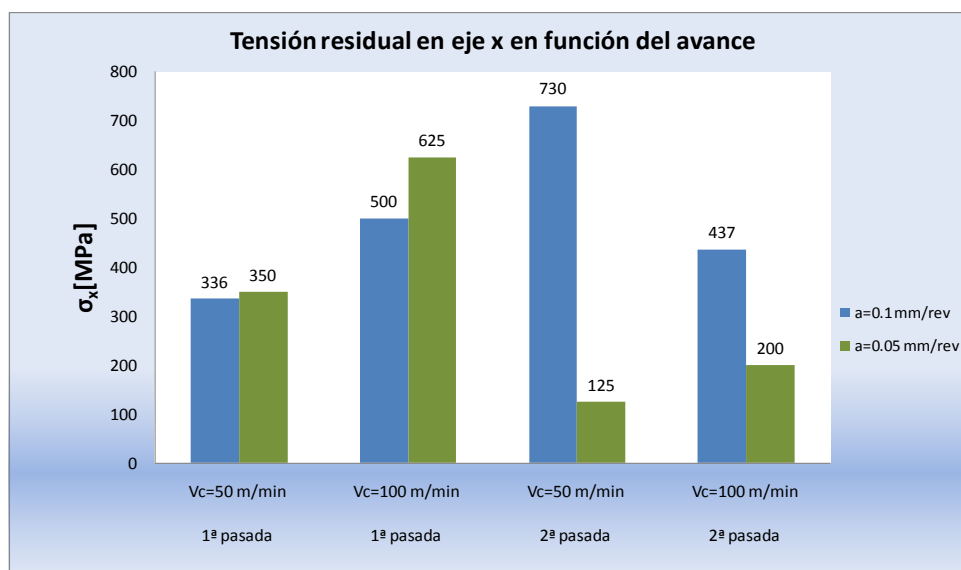


Figura 89: tensiones residuales en el eje x en función el avance

Capítulo IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

• Velocidad de corte

De los resultados obtenidos, se observa un caso singular para la 2ª pasada con avance de 0,1 mm/rev donde al aumentar la velocidad de corte disminuyen las tensiones residuales generadas.

Para los otros tres casos se tiene un incremento de la tensión residual en porcentajes altos al aumentar la velocidad de corte.

En la primera pasada, para $a=0,1$ mm/rev, el incremento es de un 48% y para $a=0,05$ mm/rev, este incremento es del 79%.

En la segunda pasada, se tiene que para un avance de 0,05 mm/rev, el incremento es del 60% al aumentar la velocidad de corte de 50 a 100 m/min.

Con esto se puede concluir, a excepción del caso singular, que al aumentar la velocidad de corte se generan más tensiones residuales, lo cual es entendible, y podría explicarse a que prima más el efecto de la expansión térmica que el del ablandamiento térmico del material.

Tabla 36: tensiones residuales en función de la velocidad de corte

COND. DE CORTE		R. NUMÉRICO	TENDENCIA	R. NUMÉRICO	TENDENCIA
V_c (m/min)	a (mm/rev)	Tensión residual en eje x (MPa) 1ª pasada		Tensión residual en eje x (MPa) 2ª pasada	
50 ↘	0,1	336	↑ 48%	730	↓ 40%
100 ↘		500		437	
50 ↘	0,05	350	↑ 79%	125	↑ 60%
100 ↘		625		200	

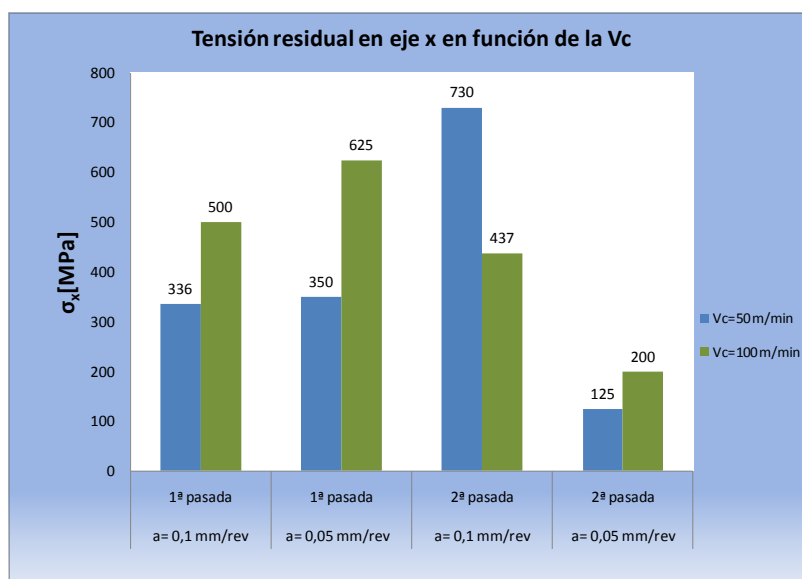


Figura 90: tensión residual en el eje x en función de la velocidad de corte

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES / LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO



5.1 CONCLUSIONES

Después de la realización del estudio mostrado, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La obtención de elementos de tamaño no superior a los 5 micrómetros en la zona de mallado denso (región de interés) es de gran importancia para la precisión de la simulación.
- Los resultados de fuerzas de corte extraídos de las simulaciones presentan una buena correlación con los encontrados en la bibliografía científica, lo que da idea de la buena aproximación y validez del modelo.
- La utilidad de una simulación numérica de cara a realizar una predicción cualitativa (tales como la morfología de la viruta), así como una predicción cuantitativa (fuerzas y temperaturas) con la consiguiente reducción de costes y tiempos en la realización de prototipos para la obtención de estos datos.
- Dichas predicciones son en algunos casos cualitativas, ya que como ocurre en el caso de las temperaturas de la herramienta, resulta difícil obtener un valor real, ya que no estabiliza debido a que el tiempo de duración del proceso es muy pequeño, del orden de milisegundos.
- La necesidad de un equipo potente para que exista un compromiso eficiente entre los datos que se quieren obtener y el tiempo que van a durar las simulaciones que queremos realizar.
- En el caso de algunas magnitudes es distinto el efecto de 1 ó 2 pasadas para $V_c=50$ que para 100 m/min. Se tiene por lo general para los casos analizados que al pasar de 1 a 2 pasadas, las tensiones residuales son menores al encontrarse la pieza más caliente y producirse ablandamiento térmico.



5.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

Partiendo de un modelo bien definido, se ofrece un amplio abanico de posibilidades de cara al estudio del comportamiento de diversos materiales tanto de piezas como de herramientas. Por ello podrían realizarse gran variedad de trabajos relacionados con el aquí presentado.

- Ensayos para optimizar y validar el modelo, caracterizando el material mecanizado en los ensayos.
- Aumentar el número de pasadas de corte simuladas para ver el efecto sobre los resultados obtenidos y permitir la estabilización de efectos como el calentamiento del material debido a las pasadas previas.
- Establecer otras leyes de fricción en las superficies de contacto herramienta-viruta y herramienta-superficie mecanizada, de cara a la comparación de resultados.
- Extender el análisis a otras geometrías de herramienta y otros parámetros de corte.
- Alcanzar temperaturas mayores en la pieza de cara a la realización de la 2ª pasada o pasadas sucesivas.



CAPÍTULO VI:

BIBLIOGRAFÍA



Capítulo VI. BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA

6.1 BIBLIOGRAFÍA

- (Åmstrom, 2004). "Simulation of Manufacturing processes in product development" Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. Division of Computer Aided Design.
- Apuntes De Tecnología Mecánica, Universidad Carlos III De Madrid (2009-2010), pp.105
- Baker, M. 2002 "An investigation of the chip segmentation process using finite elements" Technische Mechanik, Vol. 23, (1), pp.1-9
- Catálogo Sandvick, 2008
- (Childs et al, 2000) T.H.C. Childs, K.Maekawa, T. Obikawa, Y.Yamane, Metal machining: theory and applications, Elsevier, 2000.
- (Groover, 1997) "Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas" Editorial Prentice Hall.
- (Kalpakjian et al., 2002) "Manufactura, ingeniería y tecnología" Pearson Educación.
- (López de Lacalle et al, 2000), L.; Sánchez J.; Lamikiz, A. 2004 "Mecanizado de alto rendimiento, procesos de arranque" Ediciones Técnicas Ízaro. Bilbao.
- Manual de usuario DEFORM 2D Versión 8.1
- (Muñoz 2008) A. Muñoz, Análisis experimental y nuérico de las tensiones residuales debidas a mecanizado de aceros inoxidables austeníticos, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Madrid 2008.
- (Nacari M. C. 2010) "Análisis Termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de herramientas en los procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos". Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- (Oraby y Hayhurst, 1991). S.E. Oraby y D.R. Hayhurst, Development of models for tool wear force relationships in metal cutting, International Journal of Mechanical Sciences, 33 (2) (1991) pp. 125-138
- An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718. R.S. Pawade. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Mumbai, India. Acceso a través de Science Direct.
- Tesis doctoral "Análisis...." Tesis Roberto Álvarez Fernández.
- (Umbrello et al., 2006); "on the effectiveness of finite element simulation of ortogonal cutting with particular reference to temperatura prediction" Journal of Materials Processing Technology.



Capítulo VI. BIBLIOGRAFÍA

- (Trent y Wright, 2000). E.M. Trent, P.K. Wright Metal Cutting, 4th ed, Butterworth-Heinemann, 2000.
- (Zeren et al., 2004). "Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests" Journal of Materials Processing Technology. Vol 153-154, pp.1019-1025

